

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

E08-超声材料科学与技术
E08-Ultrasonic Materials Science and Technology

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



E08. 超声材料科学与技术分会

分会主席：翟薇、宋晓国、李飞、王建元、陈宗宁、闫娜

E08-01**超声场中的金属材料相变成形**

王建元，翟薇，王旭，胡亚杰，魏炳波

西北工业大学

超声凝固已有近百年的历史。近年来功率超声在铸造领域的研究逐步扩展与深化，超声的施加方式、超声的强度/可控性、可适用的材料温度区间都有了显著的优化提升。大量研究表明，超声在合金凝固过程中的作用机制、效果与材料体系的本身特征密切相关。在传统单主元合金，以及近年来广受关注的多主元合金中，超声均展现出了对于相组成、元素分布、析出相特征等关键要素的多样化的影响：（1）在单主元合金体系中，超声能够极大的细化初生相晶粒，平均尺寸降低至 1~2 个数量级，晶粒间的第 2 相溶质分布更加均匀。共晶生长的协同方式产生显著变化，产生辐射状共晶团。包晶反应过程逐步转变为包晶相直接形核生长。（2）在多主元合金体系中，超声产生更为显著的影响。其元素在两相中的分配、两相的相对体积含量可能产生成倍数级别的变化。并且容易诱导出新相的生成（如共晶相、 μ 相）。（3）对于具有沉淀强化过程的合金体系，超声凝固冷却到室温的组织中，可能产生大量的沉淀强化相，性能远高于传统铸态组织，接近“传统铸态+时效处理”后的力学性能；“超声凝固+时效处理”后，可进一步优化其沉淀相组织形态，实现 GPa 级高强合金的免塑性加工制造。通过精准的超声施加，铸态合金强塑积的提升可达 50~200%。

E08-02**熔体内超声促进原位反应生成纳米颗粒强化铝镁合金薄板显著提高疲劳和耐蚀性能**

邱丰*，杨宏宇，董柏欣，宋昌戎，姜启川

吉林大学 材料科学与工程学院

纳米颗粒可以实现金属材料的高效强化，但是纳米颗粒容易团聚，如何在纳米颗粒制备的过程中，通过超声分散方法促进纳米颗粒反应制备的同时，实现纳米颗粒在铝中间合金熔体中的分散，这对于后续纳米颗粒在铝合金的强化效果和应用具有重要的机制和意义。高含量合金化会导致成分偏析严重，微量纳米颗粒强化可实现对材料微观结构的有效调控，抑制偏析，与合金元素强化协同作用，发挥更大的强化效果。本工作采用低含量纳米颗粒中间合金作为纳米调控载体制备了 TiC-TiB₂ 纳米颗粒强化 Al-Mg 合金。分析微量 TiC-TiB₂ 纳米颗粒对含高 Mg 量的 Al-Mg 合金在凝固及后续轧制变形过程中微观组织演化的影响规律，并深入剖析其调控组织机理。实现成倍的提高 Al-Mg 合金板材的抗拉压机械疲劳性能，同时纳米颗粒强化的 Al-Mg 合金在 3.5 wt.% NaCl 溶液中腐蚀速率显著降低，由 0.00486/mm a⁻¹ 降低至 0.00255/mm a⁻¹。揭示微量 TiC-TiB₂ 纳米颗粒强化高 Mg 含量 Al-Mg 合金的强韧化机制、抗疲劳机制以及耐腐蚀机制。

E08-03**超音频脉冲电弧特性及其在轻合金直接能量沉积中的应用**

从保强*

北京航空航天大学

创新设计并研发了基于超音频脉冲电流波形的特种电弧系统及配套电源装备，实现了电弧能量与力场的协同调控。通过系统表征发现，超音频脉冲的引入显著改变了电弧的热-力分布特性：电弧压力与挺度明

显增强，能量密度显著提高，电弧形态稳定性有效改善，并成功耦合了超声能场。结合熔丝增材制造的数值模拟研究表明，该电弧可重构熔池内部流动模式与流速分布，优化温度场梯度，从而有效提升构件内部质量。在颗粒增强铝合金、镁稀土合金等新型轻合金增材制造应用中证实，超音频脉冲电弧通过精准调控熔池动力学行为，解决了轻质合金定向能量沉积中的气孔缺陷、溶质偏析核心工艺瓶颈，所获构件具有高致密度与优异力学性能，综合性能显著优于常规基于电弧的直接能量沉积工艺。本研究为高性能轻合金增材制造提供了创新性热源解决方案。

E08-04

基于晶向织构提升(K, Na)NbO₃ 基陶瓷的能量收集性能

常云飞*

仪器科学与工程学院，哈尔滨工业大学

压电能量收集技术能够捕获环境中普遍存在的低频振动进行清洁发电，在当今新能源和物联网领域需求迫切。在已知无铅压电体系中，(K, Na)NbO₃ 基陶瓷因相对突出的电学性能和高居里温度受到了广泛关注。然而，压电性能和相变温度的矛盾关系限制了其在高性能宽温区能量收集器中的发展应用。本研究采用组分设计和晶向织构结合的策略制备了(K, Na)NbO₃ 基织构陶瓷，系统研究了材料组成、模板分数、织构质量、晶相结构、电学性能和能量收集性能之间的关系。结果表明，织构过程主要分为模板成核，取向晶粒的快速长大以及晶粒发生相遇后的缓慢长大，当 NaNbO₃ 模板含量为 5 vol.% 时，陶瓷的 Lotgering 因子高达 99%。在性能各向异性和工程畴效应的协同作用下，在不降低材料相变温度的前提下，将其机电转化性能和能量收集性能大幅度地提高。在 1g 加速度下，基于最优织构陶瓷的悬臂梁能量采集器输出的功率密度是随机取向陶瓷的 3.0 倍。本工作可以开发高性能无铅压电能量收集器材料提供一条可行的途径。

E08-05

面向航空发动机关键零件的复杂曲面、深腔或半封闭结构的超声波喷丸强化技术及装备研究

赵夙*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

随着航空业的快速发展，对发动机的性能提出了更高要求，叶片、叶盘、鼓筒等关键部件，常具有复杂曲面、深腔或半封闭腔室，在长期运行过程中，易出现疲劳失效问题，严重影响其服役寿命，必须进行表面强化，但传统喷丸强化受结构限制，在深腔、半封闭等复杂结构中强化均匀性差或无法直接强化，亟需开发新型强化方法及装备以应对发动机复杂结构带来的工艺挑战。超声强化技术可以使弹丸介质在密闭腔体中以多向离散方式冲击靶材，且超声振动部件可根据工件小型化、仿形设计，对复杂干涉结构进行强化的灵活性更好，可达性更佳，能够显著提高部件的抗疲劳性能，对于保障发动机的安全稳定运行、延长服役寿命具有重要意义。本文针对航空发动机叶片、叶盘、鼓筒等含复杂结构的关键部件疲劳寿命与可靠性不能满足使用需求的问题，开展了高能超声波喷丸强化抗疲劳机理研究，以及超声喷丸强化工艺研究和成套装备研制；揭示了喷丸后表面形貌、残余应力状态及表面变质层对疲劳寿命的综合影响机理，突破了复杂曲面、深腔或半封闭腔室均匀可控超声强化技术，研制出针对复杂干涉结构的超声强化装备，实现航空发动机复杂典型结构的超声喷丸强化示范应用。

E08-06

超声骨刀在骨科手术中的应用

凌鸣*

陕西省人民医院

超声骨刀可以精确地切割硬组织，如骨骼，而对软组织的损伤相对较小。此外，超声骨刀在切割过程中产生的热量可以凝固切割区域的血管，降低手术出血的风险。因而，在骨外科特别是脊柱专业得到广泛应用。脊柱手术中，超声骨刀可以：1.精确切除椎板、椎弓根和小关节，减少对周围软组织的损害，特别是神经或血管的损害；2.减少术中出血；3.降低钻头和锯片使用中高温引起的骨组织和软组织损伤；4.提高手术效率；5.超声骨刀的微创特性，有助于缩短康复周期。

E08-07

无铅压电陶瓷及器件

吴家刚*

四川大学

压电陶瓷属于新型电子功能材料，具有独特的机电转换特性，是航空航天、电子信息、医疗健康等领域不可或缺的关键功能材料之一。目前，应用最广泛的压电陶瓷是以锆钛酸铅为代表的铅基压电陶瓷，其在制备、回收和废弃的过程中都会给社会环境和人类健康带来严重危害。为了满足环境保护和社会可持续发展的迫切需要，包括我国在内的多国政府已在电气电子产业领域推进了无铅化的法律性规定。因此，开展压电陶瓷无铅化研究，既是国际功能材料领域的重要科学前沿和技术竞争焦点，也高度符合国家发展战略目标。以钙钛矿型无铅压电陶瓷为主要研究对象，围绕其新型相界设计与局域结构调控、电学性能及温度稳定性调控机理、高性能结构起源及物理机制等关键科学问题开展研究。提出了铌酸钾钠基无铅压电陶瓷的新型相界设计与构建新思路，实现了压电常数的连续突破以及优异的温度稳定性，并成功应用到其他无铅压电陶瓷体系。在钛酸铋钠基无铅弛豫铁电陶瓷中首次诱导出了具有极性拓扑结构的纳米气泡畴，并从原子尺度揭示了该类材料高的动态机电响应的结构起源。率先从多层次多尺度阐明了钙钛矿无铅压电陶瓷高压电性能的结构起源和物理机制，为进一步优化其压电性能提供了理论指导。

E08-08

哈工大威海超声焊接与增材研究进展

周利*^{1,2}，高士康^{1,2}，刘煜纯^{1,2}，南鑫晨^{1,2}，黄祖来²，刘新洋²，宋晓国^{1,2}，冯吉才^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学

2. 哈尔滨工业大学（威海）

在航空航天、轨道交通、新能源车辆等高端装备制造领域，新型材料与结构的持续涌现使得关键结构的高质量连接与特殊构件的可靠制造成为亟待解决的核心技术问题。作为一种固相连接与增材制造方法，超声焊接及其增材制造技术正受到广泛关注。本报告紧密结合当前实际工程应用需求，综述了哈尔滨工业大学（威海）在超声焊接与增材制造技术及其装备方面的研究进展。重点阐述涵盖同种/异种金属超声焊接、复合材料超声焊接、超声辅助焊接以及超声波增材制造等关键领域的研究成果，并从技术与工艺开发、过程监测与控制、装备研制与应用等维度进行系统性介绍。本报告可为拓展超声固相连接与增材制造技术在多材料、复杂结构高效可靠连接与成形领域的基础理论研究与应用提供新的思路与实践参考。

E08-09

大反铁畸变弛豫铁电体

祁核*

海南大学

Since the relaxor ferroelectrics were found in complex perovskite compounds nearly half a century ago,

relaxors have attracted sustained attention owing to their enigmatic structure as well as excellent electrical properties, such as ultrahigh piezoelectric coefficients, excellent energy storage properties, large electrostrictive behavior and et al. Dielectric relaxation including diffuse phase transition and frequency dispersion simultaneously is the basic feature which can be found on the permittivity-temperature spectra. Even though there is not a unified theoretical model which has been widely accepted to explain all phenomenon in relaxors, it is widely accepted the excellent physical properties should be related to the unique structure feature of polar nanoregions. In our recent researches, a new kind of relaxor ferroelectrics which exhibit not only polarization order but also large antiferrodistortion (oxygen octahedral tilt) were found. Through the adjustment of the long/short range order of oxygen octahedral tilt, novel local structure features with interesting physical properties can be detected. The results found in these studies not only open up a new kind of relaxor ferroelectrics but also will lead to the reconstruction of relaxor models and theories built for more than half a century.

E08-10

奇异变形菌的超声悬浮强化及其对内蒙古低阶煤的降解过程研究

刘向荣*, 李恒宇

西安科技大学 化学与化工学院

采用超声悬浮仪对奇异变形菌菌液进行强化培养, 然后利用强化后的菌液降解内蒙古低阶煤, 并以未强化的菌液作为对照。结果显示: 奇异变形菌的最优超声悬浮条件为: 选取对数生长期的菌种, 悬浮时间为 1 min, 悬浮功率为 325 W, 悬浮菌液量为 100 μ L。经超声悬浮强化后的菌液分泌了更多的碱性物质, 强化后菌种的 O-H、C-N 和 C-H 官能团含量增加, 说明超声悬浮使菌体表面的亲水基官能团含量增多, 提高了微生物与煤的结合位点; 细胞膜通透性提高了 38.46%, 碱性蛋白酶活性提高了 20.95%, 表明菌种的代谢活性得到提高。强化后的菌液对煤样的平板降解圈较对照组增大约 4.85 mm, 对内蒙古低阶煤的降解率为 35.96%, 较对照组提高了 12.84%。采用 FTIR、XRD、低温 N₂ 吸附和 GC-MS 分别对降解后的固、液相产物进行分析, 与对照组相比发现: 强化后的菌液对煤样分子结构中含氧官能团的降解作用更强, 固相产物的微晶结构中芳香层片堆砌高度 L_c 更低、芳香层数 N 更少、比表面积更大; 强化后的菌液降解煤样的液相产物中总共检测到 33 种不同的化合物, 未强化的菌液降解煤样的液相产物中总共检测到 21 种不同的化合物, 但主要降解产物类型相似, 均包含烷烃类、酯类、氨基类、醇类和羧酸类等物质, 液相产物的分子量分别为 114 ~ 478 和 128 ~ 436。本研究结果说明利用超声悬浮强化后的菌液降解低阶煤, 提高了煤样的降解率, 促进了微生物对低阶煤的降解。

E08-11

基于超声雾化技术的微纳双尺度增强结构钛基复合材料粉末制备及其表征

刘超¹, 张悦¹, 董福宇^{*1}, 王斌斌², 骆良顺³, 苏彦庆³

1. 沈阳工业大学

2. 滨州魏桥国科高等技术研究院

3. 哈尔滨工业大学

3D 打印用钛基复合材料 (TMCs) 粉末的制备通常采用机械混合法将增强体外镶于基体粉末, 但该方法易导致增强体团聚和分布不均匀, 使其难以在后续熔融沉积过程中与基体充分反应, 从而严重影响构件打印过程和质量。解决上述问题的核心策略是从源头实现增强体的嵌入与构型化。为此, 本研究针对 (8 vol%Ti₅Si₃+3vol%TiB) 增强 Ti6Al4V 基复合材料, 创新性地采用超声雾化技术, 借助其声流效应促使增强体有效分散, 原位制备出内嵌微纳双尺度结构 (微米级等轴网状+纳米级颗粒) TMCs 粉末。实验结果表明, 制备粉末的中值粒径 (D_{50}) 为 73.05 μ m, 颗粒呈现极高的球形度 (平均为 0.96) 且表面光滑, 孔隙率仅为

0.0016%, 未发现卫星球或空心颗粒。微观组织观察发现, 纳米级 TiBw 自组装形成微米级准连续等轴网状结构, 而纳米级 Ti_5Si_3 则以颗粒状均匀分布于基体中, 二者构成多尺度协同增强体系。雾化过程的理论分析表明, 超声波激发的声流效应能够有效促进熔体均匀化, 而液滴破碎-凝固阶段的残余毛细波扰动通过提升过冷度而引起晶粒细化。纳米压痕结果显示, 复合粉末的纳米硬度最高达到 7.564 GPa, 弹性模量为 107.759 GPa。本研究表明超声雾化技术在开发内嵌式增强体 TMCs 粉末方面的应用潜力和价值, 有望为增材制造用 TMCs 粉末原料提供一种高质量、高效率的制备新途径。

E08-12

通过气囊蛋白实现的生物相容的力化学反应

姚昱星*

香港科技大学

近年来, 分子工程和生物学超声技术的迅猛发展为我们提供了在体内深层组织中施加物理作用(如机械应力)的一系列新手段, 推动了无创治疗和诊断方法的研究与应用。然而, 当前这些方法在激活或控制具体化学过程方面仍存在显著局限, 特别是在精准药物释放、细胞行为调控等生物学应用中, 尚缺乏足够高效、可控的化学响应机制。为了突破这一瓶颈, 本研究提出了一种新颖策略: 将机械化学(mechanochemistry)与生物兼容的聚焦超声技术相结合, 通过声活性蛋白的辅助, 实现远程、非侵入式地激活化学反应, 为深层组织中的药物输送和治疗性干预提供可能。传统的机械化学激活通常依赖于参数较强、可能损伤组织的超声条件。本研究通过基因编码的、充气的蛋白质纳米结构——气体囊泡(gas vesicles)诱导声空化, 使聚合物在分子骨架上预设的弱键处断裂, 从而通过化学级联反应释放小分子, 如荧光团或治疗性药物。实验结果表明, 在温和超声参数下, 机械化学的激活效率可与传统体相声化学反应相媲美。聚焦超声还能实现毫米级的空间分辨率与可编程的药物释放动力学。我们进一步在组织模拟凝胶中实现了机械化学的激活, 表明其具备在体内远程控制药物释放的潜力。最后, 我们展示了该平台可用于化疗药物的释放。本研究结合了超声物理特性、合成聚合物设计和基因工程蛋白技术, 为机械化学在生物学中的实际应用提供了新的平台和方向。未来, 该系统有望扩展到肿瘤治疗、免疫调控等多种场景中, 推动智能响应型材料和非侵入式治疗技术的发展。

E08-13

双化合物型 $\text{Zr}_{65.7}\text{Co}_{34.3}$ 共晶合金的相选择与组织演变机制

王磊^{1,2}, 胡亮¹, 耿德路¹, 魏炳波*¹

1. 西北工业大学物理科学与技术学院

2. 韩国标准化科学研究院

根据组成相晶体结构的不同类型, 二元共晶合金可分为三种: (1) 固溶体-固溶体(SS-SS)共晶; (2) 固溶体-金属间化合物(SS-IC)共晶; (3) 金属间化合物-金属间化合物(IC-IC)共晶。其中, IC-IC共晶的超常凝固机理研究相对不足。 Zr-Co 合金是典型的IC-IC合金体系, 所涉及的 ZrCo 、 Zr_2Co 和 Zr_3Co 等金属间化合物因其储氢能力和非蒸发吸气特性而备受关注。因此, Zr-Co 共晶合金的快速凝固机理研究具有重要的理论和应用意义。本文采用静电悬浮无容器与熔体快淬技术, 系统研究了深过冷条件下 $\text{Zr}_{65.7}\text{Co}_{34.3}$ ($\text{Zr}_2\text{Co}+\text{ZrCo}$)共晶合金的相选择与组织演变机制。结果表明, 静电悬浮状态下合金凝固路径呈现显著非平衡特征, 主要有三种典型机制: (1) 初生 Zr_2Co 生成后析出($\text{Zr}_2\text{Co}+\text{ZrCo}$)共晶; (2) Zr_2Co 和 ZrCo 离异生长; (3) ZrCo 、 Zr_3Co 和 Zr_2Co 三相竞争生长。实验发现, ZrCo 枝晶优先形核生长, 随后从液相中析出 Zr_3Co 相, 二者接触时发生包析反应生成 Zr_2Co 相。

E08-14

基于正交振型的磁-力-电耦合能量收集器

刘睿轩, 高翔宇*, 周济世, 高思琦, 李飞
西安交通大学

磁-力-电耦合能量收集器可以对环境中磁场能量和振动能量进行收集, 因此被应用于变压器等智能电网设备的自供电监测系统。为了实现对磁场和振动能量的同时收集, 传统的单悬臂梁结构被改进为包含异形梁的设计, 以期产生两种不同的振型来分别对应这两种能量源。然而, 由于异形梁与主梁之间存在刚性连接, 在实际服役中这两种振型往往会产生相互干扰, 大幅降低了能量收集电学输出性能。因此, 当前对于这类设备的性能评估通常是基于单独测试其在纯磁场或纯振动条件下的输出, 而不是在混合环境中进行综合评估。通过弱边界夹持效应的设计理念, 使得主梁和副梁之间可以产生两个互相正交的振型模态, 减少了两者间的干扰, 实现了各自独立的能量收集过程, 有效地解决了异形梁与主梁间的耦合问题, 确保了两种模态下的能量可以被独立且高效地收集。实验结果表面, 在 1Oe、50.8Hz 的磁场激励下, 该能量收集器的开路电压为 108.67 V_{p-p}, 最大功率有效值为 0.28 mW; 在 106.8 Hz、0.2 g 的振动激励下, 副梁开路电压为 112.08V_{p-p}, 功率有效值为 1.06 mW; 振动、磁场同时激励下, 混合能量手机功率为 1.34 mW, 为智能电网系统的自主供电提供了新的思路。

E08-15

超声对电弧增材 β 型钛合金微观组织和力学性能的调控机制

吴文华, 刘锦涛, 王建元, 翟薇*
西北工业大学

采用电弧增材制造技术能够实现高强钛合金的一体化成形, 在航空航天、船舶、医疗等领域具有重要的应用前景。然而, 电弧增材钛合金通常呈现粗大柱状晶, 且容易出现气孔、裂纹等缺陷, 导致力学性能恶化。因此, 本文以 TB13 (Ti-22V-4Al) β 型钛合金为研究对象, 利用自主构建的超声耦合电弧增材装置, 系统研究了超声对 TB13 钛合金微观组织和力学性能的影响, 并通过数值模拟揭示了超声空化和声流效应对 α 和 β 相形核生长的作用机制。结果表明, 当从基板底部施加振幅为 0.3 μm 的超声后, 平均 β 相晶粒尺寸由静态下的 1.6 mm 细化至 0.5 mm, 几何必须位错 (GND) 密度显著提升, 且主要分布于亚晶界处。相较于静态下均匀弥散分布且呈细长针状的 α 相, 超声下的 α 相呈细小球状, 沿着亚晶界形成网状结构, 数密度增加。进一步分析其元素分布, 发现超声能够提高 α 相中 V 的固溶度, 使得 V 在两相间均匀分布。超声处理后, TB13 钛合金的屈服强度和抗拉强度分别由 442 和 636 MPa 提升至 562 和 690 MPa, 延伸率由 29% 降至 27%, 表明超声能够有效提高材料的力学性能。数值模拟结果表明, 超声空化效应产生的压力过冷显著促进 β 相均质形核, 从而细化晶粒。声流效应能够抑制 TB13 钛合金熔池中的 Marangoni 对流, 降低温度梯度, 并且促进固-液界面处的溶质配分, 从而降低了溶质偏析程度。另外, 超声的机械效应提高了枝晶尖端处的位错密度, 降低了 α 相的析出能垒, 促使网状结构的形成。

E08-16

揭示超声焊接组织演变机制的纳米孪晶镀层设计及其接头强化效应

马靖远, 计红军*
哈尔滨工业大学 (深圳)

超声焊接作为一种发生剧烈塑性变形的固相焊接手段, 其高应变, 高应变速率的特点使得其焊接过程中的组织演变机制仍存在分歧, 难以根据其加工和服役环境对母材进行微结构设计。本文中利用电沉积的手段制备了不同择优取向的纳米孪晶铜镀层, 来揭示并利用超声焊接过程中的组织演变机制。通过 (110) 择优取向的铜镀层凸显了超声焊接过程中的组织演变, 并通过滑移系分析得出超声焊接变形机制。在焊接

初期,焊接界面附近晶粒在剪切变形的过程中发生晶粒旋转,形成了 $\{111\}<110>$ 的剪切织构。在焊接后期,在超声压剪复合应力状态以及界面温升的作用下,发生多滑移,剪切织构绕 RD 轴旋转形成 $\{110\}<110>$ 织构。根据所揭示的焊接机制,设计制备了(111)纳米孪晶铜镀层,避免了剪切变形时晶粒旋转的能量消耗。(111)铜超声焊接升温速率提高了 42.1%,在 600J 接头强度相较于普通的随机取向铜接头提高了 28.3%。同时,对孪晶界在超声焊接中的作用进行了研究。孪晶界通过阻碍位错运动,将应力应变集中在焊接界面处,使超声能量更加高效的利用,缓解了焊接过程中的基板损伤。本工作开辟了纳米孪晶材料新的应用场景,也为超声焊接中材料取向和晶界的设计提供了思路和依据。

E08-17

超声辅助纳米颗粒熔体内均匀分散高效强化镁合金抗疲劳损伤机制

杨宏宇,董柏欣,张鑫,邱丰*,姜启川

吉林大学

纳米颗粒强化合金是金属材料领域创新且高效的强韧化方法,但一直存在着纳米颗粒难引入、难分散、易污染三大难题,如何实现纳米颗粒无污染可控制备、同时攻克纳米颗粒在熔体中分散,是实现纳米颗粒强化合金从实验室走向应用的关键瓶颈。本工作以课题组自主研发的纳米颗粒中间合金为载体,通过超声辅助分散技术成功向镁合金熔体中引入均匀分散的微量纳米颗粒,针对镁合金疲劳损伤快的关键难题,开发出微量纳米颗粒增强镁合金型材,应力控制拉压疲劳极限强度(应力比 $R=-1$)超过 2024 铝合金,与商用 6061 铝合金相比疲劳极限提高了 26%。进一步研究了微量纳米颗粒增强 AZ91 疲劳服役过程中微观组织演变规律,揭示微量纳米颗粒增强镁合金高密度晶界/小角晶界、弱织构、共格析出相和高密度位错提高应变能存储、促进应力均匀分布和缓解微区应变累积的弹塑性机制,以及提高损伤容限和抗裂纹萌生与扩展能力的协同强化机制,为显著提高镁合金抗疲劳损伤能力贡献新机制和新技术。

E08-18

超声波处理对灰铸铁组织和力学性能的影响

亚斌*^{1,2}, 孟令刚^{1,2}, 周秉文^{1,2}, 张兴国^{1,2}, 姬生晨¹, 孟凡淇¹

1. 大连理工大学

2. 大连理工大学宁波研究院

灰铸铁作为常用的汽车发动机缸体制造材料,对于灰铸铁的性能也提出了相应的挑战。超声波处理金属熔体改性是一种绿色无污染的改性方式。本文通过在不同成分灰铸铁熔体中引入超声波处理来探究超声波处理对于不同成分体系的灰铸铁的影响,并通过改变超声参数的方式来探究不同的超声处理参数下对灰铸铁组织与性能的影响规律,达到改善灰铸铁性能的效果。

E08-19

高强韧分级结构(ZrB₂+B₄C)/Al 复合材料的声磁场调控制备与组织性能研究

怯喜周*

江苏大学

B₄C/Al 复合材料以其低密度、高强度、高中子吸收能力等特性,是理想的轻质结构材料和中子吸收材料。然而,陶瓷增强体和基体之间的热膨胀系数失配和弹性模量失配,不可避免的将基体分割为近界面的位错强化区和远界面的未强化区,造成受力变形过程中基体微区协同变形难而产生应变局域化、大幅降低塑韧性。此外,由于陶瓷增强体润湿性差、Al 熔体表面氧化膜阻碍增强体引入、以及陶瓷增强体易与 Al

反应生成有害相，制约了低成本“熔体搅拌法”制备 B4C/Al 复合材料的推广应用。研究提出通过原位自生的方法，在复合材料基体中未强化微区引入纳米 ZrB₂ 颗粒，实现近界面的位错强化区和远界面的纳米颗粒强化区协同变形，来制备高强韧的(ZrB₂+B4C)/Al 复合材料。

E08-20

超声辅助制备高性能原位纳米 TiCp/Al-Cu 复合材料研究

刘志伟*, 郝志飞

西安交通大学

铸造原位颗粒增强铝基复合材料中，基体晶粒尺寸、形态以及增强颗粒粒径分布直接影响其力学性能。基体 α -Al 晶粒细化、颗粒小粒径化及均匀分布是制备高强韧铝基复合材料的关键。本研究首先采用超声辅助液相接触法制备出组织良好的纳米 TiC-Al 中间复合材料，进而采用超声辅助重熔稀释工艺制备出铸态组织均匀的 TiCp/Al-Cu 复合材料，系统研究了材料铸态及后续热轧/热处理态微观组织和力学性能演变规律。研究表明纳米 TiC 颗粒可有效细化 α -Al 晶粒，铸态复合材料屈服强度提升，主要归因于 Orowan 强化和热错配（CTE）强化机制；热轧变形可显著破碎铸态材料中粗大第二相，提高 TiC 颗粒分散性。轧制后材料最佳热处理工艺为：530 °C固溶 12 h+水淬+175 °C时效 12 h。经过轧制/热处理后试样塑性显著提升，延伸率可达 20%以上。

E08-21

金属超声熔体处理的原位研究

赵愈亮*

东莞理工学院

超声熔体处理技术因其晶粒细化、减少宏观偏析、降低孔隙率和改性第二相的优点，在金属凝固过程中得到了广泛的应用，从而提高了力学性能和耐腐蚀性。然而，大多数作用机制都是基于传统的凝固后的微观结构中反推出来的，缺乏直接证据和现场实时观察。本文总结了近年来金属凝固超声处理的原位和实时研究。通过同步辐射 X 射线原位成像观察在超声熔体处理在铝合金凝固过程中富铁相和 Al 枝晶的形核过程，超声产生的压力场和熔体速度高达 1.5 MPa 和 150 mm/s，使熔体的热和溶质分布均匀化，均匀成核率大大提高 α -Al 枝晶和富铁相的尺寸大大减少。此外，通过同步辐射 X 射线原位衍射分析超声熔体处理对合金力学性能和变形行为的影响，研究发现：超声熔体处理大幅降低合金中富铁相的尺寸，降低应力集中，促进均匀塑性变形。合金的力学性能相比于无超声处理的合金大幅提升，这是由于超声提高了 Cu 和 Mg 的溶解度，通过固溶、沉淀和位错强化强化合金。该研究提供超声“工艺-组织-性能-强化”分析，为超声熔体处理提供理论支撑。

E08-22

超声衰减法在线监测湿法研磨过程中药物纳米晶体粒径

郭凯转, 吴韬*

北京石油化工学院 新材料与化工学院 恩泽生物质精细化工北京市重点实验室, 北京 102617

颗粒纳米化技术被广泛应用于提升溶解度较低药物分子的溶出速率和生物利用度，而湿法研磨是制备纳米晶体药物的常见方法。为了实现研磨过程的优化和精准控制，实时在线测量颗粒分布（PSD）至关重要。通常采用探头式超声衰减法来在线采集超声衰减谱，并通过 ECAH 等模型来计算 PSD。然而，这些模型往往依赖于多个难以测量且随体系状态变化而波动的物性参数，例如黏度，这不仅增加了测量的复杂度，

还可能导致模型不准确和多解问题。为了克服这一挑战，本文提出了一种结合主成分分析和神经网络的轻量级模型（PCA-NN）。以水滑石为研究对象，实验结果表明，PCA-NN 模型预测的 PSD 与离线测量结果（马尔文）高度吻合，相关系数达到 0.9875，均方根误差（RMSE）为 0.2151。此外，该方法不仅避免了复杂物性参数的采集，也消除了多解问题，且大大缩短了测量时间，将从传统的几分钟缩短至几秒钟，实现了粒径的实时在线检测与分析，显著提升了颗粒尺寸测量的效率与精度。

E08-23

超声振动对高碳钢石墨化动力学规律的影响机理

李鹏春，蒋百灵*，王子诚
西安理工大学

以 H13 钢为代表的铬钼钒系列热作模具钢虽具有优异的高温强韧性能，但在用来制造铝合金压铸模具时，因其导热系数低、及抗铝液溶蚀性能差等不足，致使每套几十上百万元的压铸模具，仅一两个月就会因腐蚀或开裂失效，成为轻量化制造业降耗增利的瓶颈之一。针对此工程难题，依据铝液与石墨的不浸润特性、和石墨的高导热特性，本研究创新性提出高频超声场辅助固态相变调控技术。通过超声诱发的机械振动能促进渗碳体分解并降低二次石墨球的形核势垒，在 Mn-Mo 系难石墨化的高碳钢基体中，成功构建了微米至亚微米尺度二次石墨球与碳化物的协同弥散分布体系。所获材料同时具备优异的导热性能、超疏铝液性能和高温强度。本研究为解决铝合金压铸模具材料寿命短这一行业难题提供了新的材料设计思路和工艺实现路径。

E08-24

超声场对二维材料复合薄膜结构调控与柔性传感应用研究

张煜浦*
西北工业大学

超声场因其独特的空化效应和声流效应，在多种材料的结构与性能调控过程中展现出优秀的实用功能，特别是对于二维材料的层数剥离、界面调控、缺陷生成等具有独特的作用效果。二维材料因其独特的结构和性能优势，包括：各向异性、可调谐带隙、高载流子迁移率、高电流开关比和出色的电子供体能力等，在多种柔性传感器件中应用前景广阔。本文研究了超声场作用下成功实现几种二维材料复合薄膜的结构调控与性能优化，并在声学、压力、光电和光热等柔性传感领域的优秀功能应用，包括：1) 通过超声辅助法制备了单位面积热容量低、层间距大、导电性好、具有三维周期有序结构的 BP/MXene 复合薄膜，并成功将其集成在阳极氧化铝、聚酰亚胺和振动线圈上制备出多种具有优异性能的声学器件；2) 通过超声化学法制备的 BP/CNT@PVDF 复合薄膜，能够在高压范围 25 Pa-3.3 MPa 下展示出高压传感性能，可有效应用于高低温（-196-200℃）等极端压力条件下的压力传感需求；3) 通过超声复合和逐层组装法制备了具有类指橙的片状-球形结构的 BP/ZnO 复合薄膜，以 MXene 为柔性电极制备的 MXene-BP/ZnO 光电传感器对 UVA 具有高达 7 mA·W⁻¹ 的特异性响应，并用于人体皮肤健康防护中展现出良好的稳定性。4) 利用超声化学合成法制备出具有类叶绿体结构的 CSS@BP 复合材料，展现出优秀的光热性能，并进行了 CSS@BP/Bi₂Te₃ 光热电转换阵列结构设计，组装设计出抗环境干扰能力强的飞行姿态识别应用装置。这些超声场对二维材料复合薄膜的结构优化、传感性能提升和多功能应用的成功尝试工作，为下一代传感材料与器件制备技术的开发与应用研究提供了新的思路。

E08-25

超声治疗技术在神经疾病治疗中的应用：机制突破与临床转化

李锐
陕西省人民医院

超声在医学中的应用场景正在从诊断向治疗转变。超声可通过机械/热/空化效应可实现生物功能调控。从而应用于脑血管病、各种震颤性疾病如帕金森病的创新治疗，超声还可开放血脑屏障，极大提升药物向大脑递送效率，从而用于脑胶质瘤、阿尔茨海默病等疾病的治疗。新的技术可拓展至神经精神疾病调控与卒中溶栓增强等。本汇报将结合最新的多项超声在神经疾病治疗中的研究结果进行论述。

E08-26

增材制造热作模具钢及压铸模具随形控温模芯的增材制造

陈豫增*
西北工业大学

增材制造随形控温模芯可显著提高压铸模具的控温精度与控温效率，在轻合金压铸领域有重要应用前景。但传统热作模具钢增材制造工艺性能差，所制造的模具部件易开裂且寿命短。本报告将介绍本团队所研制的增材制造专用热作模具的性能及评价方法，并进一步介绍压铸模具随形控温模芯的设计及增材制造，进一步通过具体案例展示随形控温模芯的应用效果。

E08-27

铝合金熔铸超声场调控的若干现象及展望

陈宗宁*, 赵凯, 张宇博, 王同敏, 李廷举
大连理工大学

超声场在液体中独有的非线性效应会引发一系列物理现象，在铝合金熔体中施加超声波振动，具有除气、晶粒细化、颗粒解聚等多重作用，长久以来收到学术界广泛关注。然而，目前铝合金熔铸过程中的超声场调控应用十分有限，根本原因在于超声场局域干预特征与大规模生产难以并入，缺乏非用不可的应用场景。因此，重视发展以熔铸为基础的低成本超声场施加装备，解决核心应用场景关键需求与超声场共性难题之间的矛盾，是推动其走向产业化的重要路径。大连理工大学外场凝固控制团队与超声波设备制造企业深度合作，开发高耐久性 Sialon 和改性 Si₃N₄ 工具头，以及谐振系统专用的冷却系统，显著提升了超声波装备在铝熔炼与铸造过程中的施加时间，为高性能铝合金的制备加工提供了新的调控思路。

E08-28

超声波作用下多空化气泡动力学调控机制研究

王成会, 雷照康, 马佳昱
陕西师范大学陕西省超声学重点实验室

强度超过空化阈值的超声波作用于液体可在液体内部激发空化气泡，气泡间的相互作用和动力学行为演化是重要的研究课题。气泡作为液体内的声能转换器，非线性振动气泡的剧烈崩溃可能在液体内部产生局域高温高压、声致发光和冲击波等，可形成有利于促进化学反应和物质合成的极端物理条件。多气泡体系存在复杂的自组织行为，引发空化泡的团聚现象，形成锥形、葡萄串形、分枝状结构等聚集结构。气泡的聚集行为与声场分布、边界条件以及气泡间相互作用等因素密切相关，为探索气泡聚集行为发生的本质，基于不同气泡聚集行为表象特征以及界面的调控影响，我们发展了不同的理论模型解释了气泡动力学行为演化机制。

E08-29

超声辅助水下局部干法激光增材组织及性能调控

付云龙*

哈尔滨工业大学（威海）

钛合金由于具有比强度高、耐腐蚀、抗侵蚀等优点，已逐步应用于钻井隔水管、平台支柱等海洋工程装备。面向 TC4 钛合金海洋装备水下原位修复需求，在开发双层气幕式水下激光增材排水焊炬的基础上，构建了水下局部干法丝式激光熔化沉积增材制造系统；基于 X 射线原位观测系统，阐明了水下激光熔化沉积传质过渡行为及沉积层控形机制；建立了水下激光熔化沉积温度场有限元模型，探究了水下激光增材金属晶粒、微观组织转变机理及其对力学性能的影响机制。在水下局部干法激光增材的基础上引入超声能场，提出了“超声辅助+工艺调控”的研究思路，实现 TC4 钛合金水下局部干法激光增材晶粒组织及性能调控。

E08-30

超声波对金属液滴润湿过程的影响机制研究

胡亚杰^{1,2}，翟薇*¹

1. 西北工业大学

2. 西安交通大学

润湿过程的精准调控在电子封装、微纳制造、复合材料制备等过程中至关重要，探索高效、环保且具有广泛适用性的润湿性调控手段，已成为实现材料和器件高质量制备的迫切需求。本文通过自主研制设计的高温液滴润湿过程观测装置，系统研究了超声作用下 Al、Cu 金属液滴与 SiC 陶瓷基板之间的动态润湿过程，阐明了超声波对润湿性的调控规律。不同过热度及超声振幅下的观测结果表明，超声作用下 Al 和 Cu 液滴的润湿铺展时间均为 100 ms 左右，其动力学过程可以分为三个阶段：表面波诱导的周期性缓慢铺展、声流驱动的快速润湿以及最终的平衡振荡。建立了润湿角与温度、超声振幅之间的经验公式，发现随着超声振幅的增大和过热度的升高，两种液滴的润湿角均不断减小。其中，Al 液滴由于具有更低的表面张力和更小的密度，相同超声振幅下的润湿角数值显著高于 Cu 液滴。基于液滴三相点处的修正杨氏方程，进一步计算了超声作用下的固液界面能特征。静态条件下 Cu 液滴的固液界面能高于 Al 液滴，超声作用下两种液滴的固液界面能均随着超声输入能量的增大而线性增加。由于 Al 液滴具有更高的界面能量转换系数，因此在高振幅超声条件下，Al 液滴的固液界面能反而高于 Cu 液滴，展现出更优异的润湿可调控性。

E08-31

超声化学法驱动 SnS₂ 表面重构制备高性能光电探测器王文璨¹，田维²，陈芳¹，王建元¹，翟薇*¹，李亮²

1. 西北工业大学

2. 苏州大学

相比于硫化物材料，硫氧化物异质结因其较高的载流子分离率，通常展现出更优的光电性能。然而，硫化物在室温条件具有良好的稳定性，难以在常规条件下发生氧化反应，传统的氧化方法依赖高温、高压环境或强氧化剂，这不仅增加工艺复杂性与能耗，还缺乏对氧化程度的精确调控。作为一种绿色合成技术，超声化学法不仅可以为化学反应提供反应条件，而且易于控制，是实现温和、可调氧化处理的理想手段。超声化学法的核心在于空化效应，其产生的自由基可以断裂材料表面化学键，诱导其发生原位转变；另外，空化引起的声流效应可以促进液相中的物质传输，驱动材料的二次生长。本文采用超声化学法对 SnS₂ 纳米片阵列进行改性，通过调节溶液中的稳态空化强度，构建出表面氧化程度可控的 SnS₂-SnO₂ 传输层，进

而显著提升其光电探测性能。稳态空化对 SnS₂ 的作用体现在两方面：（1）稳态空化产生大量自由基，断裂 SnS₂ 表面化学键，诱导 SnS₂ 发生原位氧化反应，从而在 SnS₂ 纳米片表面生成 SnO₂ 纳米颗粒；（2）二维薄膜边缘区域受到机械应力作用下破裂，在溶液中被氧化，在声流作用下重新转移至薄膜边缘，实现 SnO₂ 纳米颗粒在 SnS₂ 纳米片表面的二次生长。通过控制稳态空化强度可以精确控制 SnO₂ 的生长密度。这种 SnS₂-SnO₂ 复合结构显著提高了器件的光电性能，对 700 nm 光的响应度提高了约 20 倍。此外，在不同区域施加变强度超声，实现不同光响应特性单元的集成，并利用其响应差异实现高精度波长识别，识别精度为同类器件最高（误差<3 nm）。本文展现出超声化学法在金属硫化物表面结构可控重构中的独特优势，为高性能光电探测器的构建提供了全新的技术途径。

E08-32

超声能场作用下铝合金搅拌摩擦焊接冶金过程与接头强化机制

赵运强^{*1}，张可欣^{1,2}，林志成¹，尤佳庆^{1,2}，刘喆¹

1. 广东省科学院中乌焊接研究所
2. 沈阳工业大学

超声振动的“声至软化效应”可降低金属塑性变形时的抵抗能力。基于此，本文针对不同铝合金，铝/铜异种材料等开展超声能场对搅拌摩擦焊接过程冶金及接头力学性能影响的研究。结果表明，超声可显著降低焊接载荷及峰值温度，改善沉淀相形态，抑制金属间化合物层长大，进而提升接头力学性能。

E08-33

钛/铝异种金属超声波焊接及界面 IMC 生长机理研究

张超群*

中山大学

通过超声波焊接成功实现了 AA2139 高强铝合金与 TiAl6V4 钛合金的异种金属连接，焊接界面上未形成明显的金属间化合物（IMC）层，展现出优良的接头强度。焊接过程中硅、镁等合金元素在界面处偏聚，作为扩散屏障抑制了 IMC 的形成和生长。研究了铝-钛界面 Al₃Ti 层的生长动力学，发现在 600 ℃ 和 630 ℃ 退火时，由于较高温度(630 ℃)下 Al₃Ti 晶粒的快速粗化，导致在较低温度下形成了更厚的 IMC 层，出现反常温度效应，定量分析表明晶界扩散是主要扩散机制，晶粒粗化导致高温下有效扩散系数降低。研究了较低退火温度（500 ℃）下 Al-Ti 界面 Al₃Ti 层的非抛物线生长行为，观察到明显的孕育期，界面上存在残余氧化层和富氧层，它们作为扩散障碍和氧原子来源，影响 Al₃Ti 层的生长。

E08-34

冷喷涂复合钎料层钎焊陶瓷基复材和高温合金

王鹏程*

西北工业大学

针对新一代超高速飞行器中陶瓷基复合材料和高温合金钎焊连接中高残余应力的难题，提出一种冷喷涂复合钎料层钎焊陶瓷基复材和高温合金的新方法，即采用冷喷涂技术将 WC/CuTi 和 NiTi 复合钎料喷涂在高温合金表面。冷喷涂过程中金属颗粒的大塑性变形机制将添加相“锚定”在图层内部，实现了高含量添加相的均匀分布；冷喷涂钎料层与高温合金之间的紧密结合促进了钎料与高温合金的扩散和冶金反应，减少了金属钎料与陶瓷基复材之间脆性化合物生成，优化了接头的组织结构，显著提高了钎焊接头的力学性能。

E08-35

电解制备高性能铝合金及超声协同调控机制研究

刘轩*, 薛济来

北京科技大学

金属铝密度低、体积比能量高、资源丰富,可用于最具发展潜力之一的轻量化材料和先进清洁储能铝-空气电池技术,备受国内外关注。本文研究熔盐电解制备合金过程超声协同对铝合金组织结构、力学性能及电极能量转化效率的影响规律,提出了熔盐电解铝合金及组织结构与性能调控制备技术路线,发现超声协同、冷却速率可以显著细化强化相并且促进其均匀分布,有利于提高 Sc、Ce 对合金的强化效果。研究结果对冶金制备高性能铝合金及电极关键工艺基础提供相应基础技术数据和参考。

E08-36

人体友好型无铅压电医用雾化器

姚方周*

乌镇实验室

压电材料能够实现电能与机械能之间的直接转换,因此在医用超声雾化器等众多领域得到广泛应用。然而,当前主流医用超声雾化器存在一个常被忽视的健康隐患:其核心部件采用含铅的 $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ (PZT) 基压电陶瓷,当压电陶瓷表面的保护膜破损时,酸性药液在超声振动作用下会腐蚀陶瓷材料,导致患者暴露于有毒铅环境中。本研究通过多尺度结构工程制备出高性能 $(\text{K,Na})\text{NbO}_3$ (KNN) 基无铅压电陶瓷,并对含铅与无铅压电器件的重金属中毒风险进行了系统评估。实验表明,含铅压电材料接触典型酸性药液后铅离子析出量高达 150 ppm。因此,连续雾化治疗可使儿童血铅水平远超 0.035 ppm 的安全阈值,造成不可逆的健康损害。为消除这一风险,我们首次推出人体友好型无铅医用超声雾化器,为患者提供健康安全的无铅解决方案。该成果标志着 KNN 无铅压电材料首次实现商业化应用以替代 PZT,将加速压电材料无铅化进程,符合全球可持续发展目标。

E08-37

功率超声调控 FeCoNiCuAl 高熵合金凝固组织与应用性能

王旭, 王建元, 肖楷瀚, 翟薇*, 魏炳波

西北工业大学

含 Cu 高熵合金由于低成本、抗腐蚀等优点近年来受到广泛关注。然而, Cu 元素极易在晶界附近产生严重偏析,恶化合金应用性能。超声凝固是改善合金溶质偏析的有效方法。因此,本文将不同维度的超声波导入 FeCoNiCuAl 高熵合金凝固过程,系统研究超声条件下组织形态以及溶质分布的演变规律。结合声场主动设计,阐明了超声场中合金动态凝固机理,提出了 Cu 偏析抑制的超声作用机制,实现了力学性能和抗腐蚀性能的显著提升。研究结果表明,静态凝固条件下,贫 Cu 的初生 α 相生长为粗大枝晶,富 Cu 的 γ_1 相分布在枝晶间。一维超声作用下稳态空化促进杂质颗粒与熔体润湿,一定程度上提升初生 α 主相的形核率。随着超声维度的增加,合金熔体中瞬态空化能量的占比逐渐提升。三维超声条件下,瞬态空化诱发的局域深过冷提高 α 与 γ_1 相形核率近 3 个量级,两相之间由顺序形核转变为竞争形核, γ_1 相体积分数由 13% 增长至 50%。同时,强烈的瞬态空化效应显著降低 γ_1 相晶核中的 Cu 元素浓度,最终凝固组织中 α 与 γ_1 相的 Cu 浓度差异从 31.2 at% 大幅降低至 3.8 at%。三维超声凝固组织的屈服强度、抗压强度和塑性较静态凝固组织同时提高了 20%、27% 和 24%,综合性能优于其他方法制备的同成分合金。Cu 元素的均匀化、 γ_1 相体积分数的增加以及 α 相的细化共同促进了合金的强韧化。同时,合金自腐蚀电流密度降至静

态条件下的 23%，抗腐蚀性能明显改善。

E08-38

聚醚醚酮/钛合金异质接头超声波焊接工艺研究

刘鑫，付伟*，宋晓国，艾鑫，沙则含

哈尔滨工业大学（威海）

在“双碳”战略引领绿色变革的大环境下，轻量化成为未来交通、运输行业发展的重点方向。高分子复合材料（FRTP）、钛合金具有高强、高韧、轻质、耐蚀等优点，在汽车、飞机等制造业中扮演越来越重要的角色，热塑性塑料与金属的快速固相连接对于结构轻量化具有重要意义。本研究采用纵波超声焊接聚醚醚酮(PEEK)与激光织构化 TA1 钛合金。研究了网格织构中网格间距对微观组织和接头强度的影响。在超声波焊接压力作用下，熔融的 PEEK 塑料嵌入到 T 钛合金板材内部，从接头的能谱分析来看，接头存在一定厚度的扩散层。通过 XPS 以及 DFT 分析，表明界面形成 Ti-O-C 键，金属塑料的结合是由机械互锁和化学键结合的双重结果。纹理化增大了 PEEK 与钛合金的接触面积，以及在 TA1 表面形成 Ti-O 层，促进机械互锁和化学结合，极大的提高了接头的强度。

E08-39

基于多层单晶的微型压电旋转马达研究

耿志新，高翔宇*

西安交通大学

压电行波马达因其强大的推力和稳定的运动而备受关注，在航空航天、精密制造等领域有着诸多应用。然而随着科技的不断进步发展，对于驱动器提出来要求也越来越高，压电行波马达在小型化与低压驱动的同时提升其性能仍然是一个挑战。因此我们提出一种小型行波马达，与传统行波马达不同，采用多层的梯形弛豫铁电单晶来代替扇形陶瓷片作为压电元件，在减小粘贴面积与简化加工工艺的同时提升其性能、降低驱动电压。该马达尺寸仅 8mm×8mm×2mm，重量仅 0.5g，转速可达 300r/min。20Vpp 电压下能转动 50g 负载，推重比达 100 倍，其单位体积的负载能力高达 3.9 mN/mm³，比现有报道的小型马达高出 1-2 个数量级，同时该电机所需的功率仅为 0.2W。该小型压电马达可以集成于微型可穿戴设备中，在水下环境进行磁场信号发送，有望应用在深度定位与位置搜索等领域。

E08-40

超声振动对低铍铜合金组织及性能调控

王瑾贇，洪振宇*

西北工业大学物理科学与技术学院

电子元器件、机械加工和交通运输等领域的快速发展对高强高导铜合金的需求日益增长。高铍铜合金虽具有优异的强度，但其较高的铍含量导致合金导电导热性能下降且生产成本高昂。相较而言，低铍铜合金在保持较高导电导热性能的同时更具成本效益，然而合金力学性能的不足严重制约了其工业应用。因此，在不牺牲低铍铜合金优良导电导热特性的前提下提升其力学性能，已成为当前亟待解决的关键问题。本文选取 Cu-0.2wt.%Be-1wt.%Co 和 Cu-0.2wt.%Be-1wt.%Ni 三元低铍铜合金，分别开展超声凝固与超声表面处理，系统探究超声振动对合金组织与性能的作用机制。超声凝固实验表明：随着声场强度不断增加，Cu-0.2wt.%Be-1wt.%Co 合金的枝晶组织逐渐细化乃至消失，最终转变为细小的等轴晶，晶粒尺寸从 1673.6 μm 下降至 103.8 μm，合金硬度由初始 107 HV 提升至 150 HV，而电导率保持在 28~33% IACS。此外，对

固溶冷轧后的 Cu-0.2wt.%Be-1wt.%Ni 合金进行超声表面和时效处理, 实验结果表明: 合金表层形成了约 200 μm 作用深度的梯度变形区, 同时基体内部也产生了大塑性变形。经双重塑性变形及时效处理的合金展现出优异的综合性能, 如高的抗拉强度 (894.7 MPa), 延伸率 (18.3%) 和电导率 (60.1% IACS)。上述研究结果表明, 超声凝固与超声表面处理技术可有效调控低铍铜合金的组织与性能, 为推动其在工业领域的广泛应用提供了重要技术路径。

E08-41

KNN 基压电材料在电场下的构效关系

张茂华^{*1}, 赵倡皓², 汤浩正³, 龚文¹, 王轲^{1,3}

1. 乌镇实验室
2. 西安交通大学
3. 清华大学

与锆钛酸铅 (PZT) 材料类似, 无铅压电陶瓷的机电耦合性能通常在相界附近显著提升。多年以来人们通过组分优化和相界调控, 在铌酸钾钠 (KNN) 基压电材料中构建了正交-四方 (O-T) 的多晶型相界 (PPB) 和菱方-四方 (R-T) 的准同型性相界 (MPB), 成功将 KNN 基无铅压电陶瓷的压电性能提升至接近 PZT 的水平。然而, KNN 基无铅压电陶瓷在相界处压电响应增强的具体物理机制仍需深入研究, 这将为进一步提升材料性能提供重要的理论指导。本报告将以组分位于 O-T 和 R-T 相界处的 2 种高性能 KNN 基压电材料为研究对象, 利用第一性原理计算、分子动力学模拟、中子散射、原位变电场 X 射线衍射等分析表征手段, 从宏观物理性能、结构畸变、畴壁运动、结构变化等多维度对材料进行构效关系研究, 试图回答以下问题: (1) KNN 基压电材料的压电性能为何在相界处得到增强? (2) 为什么并非所有相界组分都具有高压电响应? (3) R-T 相界是否在 KNN 中真正存在? (4) R-T 相界与 PZT 材料中的 MPB 有何异同?

E08-42

基于铅基弛豫铁电单晶的水浸检测型超声换能器研究

孙恩伟*

哈尔滨工业大学

无损检测中水浸超声检测技术因其不易损伤工件、超声波的发射和接收较为稳定、探伤系统使用寿命较长等优点被广泛应用于船舶裂纹检测、航天器件的安全检查、材料的纯净度检测等领域。性能优异的水浸超声检测系统的核心器件是一个具有大带宽和高灵敏度的超声换能器, 而换能器的关键组成部分是压电材料。传统锆钛酸铅压电陶瓷材料因为成本较低、稳定的压电性能被广泛用作超声换能器的制作, 但因其厚度机电耦合系数和压电常数较低, 限制了换能器的分辨率和探测深度, 无法应用于高精度的检测领域。低浓度 Mn 掺杂铌铟酸铅-铌镁酸铅-钛酸铅 (Mn:PIN-PMN-PT) 是一种新型高性能压电材料, 其压电常数 d_{33} 大于 1200 pC/N 并有较高的机电耦合系数, 在高性能水浸压电换能器的研究领域具有很大应用前景。本文使用超声-电谐振法对 Mn:PIN-PMN-PT 压电单晶全矩阵参数进行了系统表征。对单晶基 1-3 压电复合结构进行了有限元仿真分析, 综合考虑复合压电材料声阻抗、声衰减以及厚度机电耦合系数, 得到了较合理的压电相体积分数及纵横比。制备了 1-3 型环氧树脂/Mn:PIN-PMN-PT 压电复合材料, 其压电常数 $d_{33}=801\text{pC/N}$, 厚度机电耦合系数 $kt=0.73$ 。另外, 制作了匹配层和背衬材料, 与 1-3 压电复合材料进行组装得到水浸式压电复合换能器, 得到 Mn:PIN-PMN-PT 复合型压电超声换能器带宽为 111.43%, 插入损耗为 -25.2dB, 性能远优于 PZT 制成的换能器。

E08-43

用于发动机叶片无损检测的复合材料光声换能器

李晓天*

湖南大学

激光无损检测是无损检测的前沿方向。与其他技术相比,激光无损检测具有非接触式、材料兼容性好等优势,已在航空工业中得到了商业化。但是,现有的激光无损检测技术系统设备昂贵,适用范围受限。本项目提出一种非接触式激光超声无损检测新工艺,在被测样品表面低成本大面积制备复合材料光声换能器,同时采用单根复合光纤来同时传递激励激光和探测激光,实现了单光纤无损检测。这种复合材料光声换能器采用骨胶原与碳纳米管复合,通过脉冲激光在碳纳米管中产生的热效应,成功将激光产生的超声波强度提升 90 倍。同时,实现了激光在单根复合光纤中的发射和探测,为这项技术在发动机叶片无损检测中的应用奠定了基础。

E08-44

可穿戴超声微针贴片用于癌症免疫治疗

蒋来明*

四川大学

癌症治疗的临床方法面临着几个相互关联的挑战,包括药物输送效率低、潜在的不良副作用和不便。在这里,我们介绍一种集成的可穿戴柔性超声微针贴片(wf-UMP),它是一种便携式平台,可用于方便、高效和微创的癌症治疗。wf-UMP 采用一体化生物电子概念,集成了用于声发射的可拉伸无铅超声换能器阵列、用于强力粘附和声耦合的生物粘性水凝胶弹性体,以及装载有生物兼容压电纳米粒子的可溶解微针贴片,用于无痛药物传输和活性氧生成。wf-UMP 具有柔软的机械特性和更强的机电性能,可以牢固地佩戴在弯曲和动态组织表面,从而实现轻松有效的操作。在涉及小鼠的临床前研究中,wf-UMP 通过诱导肿瘤细胞凋亡、放大氧化应激和调节免疫细胞增殖,显示出显著的抗癌效果。此外,wf-UMP 和 Anti-PD1 的协同免疫疗法通过激活免疫原性细胞死亡和调节巨噬细胞极化,进一步提高了抗癌免疫力,抑制了远处肿瘤生长和肿瘤复发。

E08-45

基于 3D 打印制备的柔性压电材料与器件研究

袁小婷*

北京大学

柔性压电电子学因其集成多物理感知与能量转换功能,已成为智能可穿戴设备和物联网系统的关键支撑技术。本工作围绕聚偏氟乙烯(PVDF)及其共聚物 PVDF-TrFE,系统开展了多材料构筑与多机制协同增强研究。首先,提出并实现了一种具有交错倾斜极化结构的 3D 打印 PVDF-TrFE 膜,实现高灵敏度(1.47 V/kPa)和高功率密度(478 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)的压电输出,显著优于传统极化方式,展示其在仿生皮肤和柔性机器人触觉感知中的应用潜力。进一步,通过引入机械定向应力场(MDSF)策略,制备出无需高压极化的 PVDF 纳米复合材料,材料在室温下可直接展现优异的压电性能,为安全、简便的柔性器件制备提供新方案。在此基础上,提出多机制协同增强策略,结合 PZT 纳米粒子掺杂、微空腔结构构建和浮动电极布置,构建高性能压电纳米复合材料体系,压电系数提升至 228 pC/N,有效功率密度高达 13.2 mW/cm²。此外,还构建了基于橄榄球壳结构的 3D 打印柔性能量采集器,其多层 PVDF-TrFE 薄膜实现 16.4 mW/cm² 的峰值功率密度。相关工作作为柔性压电器件的大功率输出、高通量制造与多功能集成提供了理论基础与工程支撑。综上,研究成果为高性能、可定制的柔性压电器件提供了新材料、新结构和新工艺路径,具备广阔的工程应用前景。

E08-46

三维超声场中(FeCoNiCr)85Mo15 高熵合金微观结构转变与力学性能协同提升

高文君, 王旭, 王建元, 翟薇*, 魏炳波

西北工业大学

共晶高熵合金组织由软相和硬相交替排列形成层片共晶, 表现出优异的综合力学性能。前期研究开展了(FCC+BCC)型共晶高熵合金的超声调控研究, 取得了显著的组织 and 性能调控效果, 但(FCC+Sigma)型共晶高熵合金的动态凝固规律尚不清晰。本研究以(FeCoNiCr)85Mo15 共晶高熵合金为对象, 开展了不同振幅的三维超声凝固实验, 研究了在三维超声凝固条件下共晶微观结构转变及对应的力学性能变化规律。研究发现, 弱超声条件下($\gamma+\sigma$)片层共晶结构显著细化, 超声引起的高频振动使 γ/σ 界面取向关系由 $[001]\gamma//[112]\sigma$ 和 $(-110)\gamma//[11-1]\sigma$ 转变为最稳定的界面关系: $[011]\gamma//[1-110]\sigma$ 和 $(-11-1)\gamma//[001]\sigma$ 。随着超声振幅的增加, 在强超声产生的剧烈瞬态空化效应作用下, 部分片层共晶演变为离异共晶, 同时 σ 相由四方结构完全转变为密排六方结构。而超声诱导的强声流效应促进 γ 相生长过程中的 Cr 元素扩散, 使剩余液相成分接近共晶点, 导致新型($\gamma+\mu$)共晶的形成。三维超声凝固大范围有效调控合金强度与塑性, 突破了传统强度塑性平衡的限制。超声凝固后的合金最大屈服强度、极限强度和延展性分别达到 2000 MPa、2197 MPa 和 21.4%, 与静态凝固合金相比分别提高了 1.4 倍、1.2 倍和 2.1 倍。强度的提升主要归功于弱超声下形成的稳定界面关系以及($\gamma+\sigma$)片层状共晶的细化。强超声条件下离异共晶中 FCC 结构的 γ 相体积分显著增加以及 σ 相晶体结构转变共同改善了合金的延展性。

E08-47

基于 PMN-PT 压电单晶的阵列超声换能器设计与制备研究

张章*¹, 刘丽莎¹, 刘震¹, 李玲¹, 罗豪甦², 汪尧进¹

1. 南京理工大学

2. 中国科学院上海硅酸盐研究所

随着个性化、便携化、精准化智慧医疗的快速发展, 面向医学超声应用的高性能超声换能器的需求日益增加。近年来, $[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{(1-x)}-[\text{PbTiO}_3]_x$ (PMN-PT) 单晶凭借其优异的压电性能使其在超声换能器的设计中具有显著的优势。然而高端单晶超声换能器的设计需要声学、电学、材料等多学科交叉融合, 制备技术“瓶颈”依然存在。该工作主要基于 PMN-PT 单晶压电振子电学、声学特性, 结合一维等效电路模型和多物理场有限元模型仿真模拟, 对不同声学结构的相控阵换能器以及柔性可拉伸超声器件的电、声性能进行仿真、制备与封装测试, 通过多次实测与仿真结果的对比分析实现高性能阵列器件的制备。相控阵单晶换能器的制备研究结果显示, 相对比直流极化(DCP)方式, 采用交流极化(ACP)方法可以显著提高单晶的压电性能(d_{33} 提高 35.3%, k_{33} 提高 0.05)且具有更小的横向寄生振动, 因此使得超声换能器具有更强的能量传输效率(灵敏度提升~1.5 dB)和更高的频域带宽(提升~6%)。同时引入声能反射叠层, 有效改变了换能器阵元的振动模态和声波传输方式, 解决了换能器带宽与灵敏度相互制约的问题。脉冲回波声学响应表明优化单晶阵列-6 dB 带宽较传统单晶阵列提升 12.66%, 灵敏度大幅提升 5.62 dB。基于上述优化结构, 制备并封装出面向成人心脏超声成像应用的 2.7 MHz 相控阵超声换能器, 超声成像结果显示具有更好的成像分辨率、清晰度和穿透深度。此外, 基于 1-3-2 型 PMN-PT 单晶/环氧树脂多级压电复合材料开展了柔性可拉伸超声器件的设计研究。研究结果显示 1-3-2 型 PMN-PT/环氧树脂单晶多级复合材料的优值参数 $d_{33} \cdot g_{33}$ 达到 $57700 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$, 显示出良好的压电接收性能和声电信号转换潜力。设计制备的 4*4 阵列式柔性可拉伸超声换能器在 200 V_{pp}、580 kHz 条件下激励输出电压幅值达 25.1 V, 转换效率达 12.5%。此外, 针对超声波定向传输的特点, 基于单晶复合材料制备出环绕式柔性可拉伸超声换能器, 在生物组织中显示 360° 旋转范围内接收电压信号幅度仍能保持 75% 以上的初始电压信号幅度。无线声信号传输显示其接收信号波形与激励信号波形高度一致, 还原了初始信号的信息分布, 意味着环绕式柔性超声换能器在无线信号

传输领域具有良好的应用场景。

E08-48

超声辅助微量纳米颗粒分散实现精准调控镁合金超塑性变形机制

董柏欣, 杨宏宇, 邱丰*, 姜启川

吉林大学

微纳米颗粒引入可实现镁合金多级微观组织细化, 诱导更多非基面滑移系开启, 提高强塑性并拓宽加工窗口。如何克服纳米颗粒在基体中难微量化、难引入、难分散等关键瓶颈, 是进一步提高镁合金使役性能和高温成形能力的关键。针对镁合金细晶组织易粗化、超塑性变形能力不足等瓶颈难题, 开发纳米颗粒熔体内原位合成及超声动态分散新技术, 将纳米颗粒均匀引入镁合金中, 可实现对镁合金超塑性变形的精准调控。通过超声辅助纳米颗粒分散均匀, 随后热挤压及一步退火简单工艺, 进一步调控晶粒、第二相、变形织构及亚结构等超塑性特征微观组织, 提高细晶热稳定性, 实现 300°C 下 Mg-Al 系热挤压镁合金超塑性变形量由~192%到~620%的显著提升。通过微量纳米颗粒有效调控, 构建镁合金超塑性特征微观组织并提高其热稳定性, 揭示了纳米颗粒控制镁合金超塑性行为及其多因素动态交互变形协调机制, 为发展新型高成形性镁合金提供新思路 and 理论支撑。

E08-49

液态 CoCrFeNiSi0.8 高熵合金的热物理性质与快速晶体生长

朱光耀, 耿德路, 魏炳波*

西北工业大学

本文采用超声悬浮与电磁悬浮无容器处理技术实现了液态 CoCrFeNiSi0.8 高熵合金的深过冷, 研究了其快速凝固规律, 两种实验方法获得的最大过冷度分别为 148 和 192K。DSC 热分析、母合金凝固组织和透射电镜结果表明, 其近平衡凝固路径为 L→FCC 和 L+FCC→SC-Cr3Ni5Si2 (简单立方 Cr3Ni5Si2)。使用液滴振荡法测定了 CoCrFeNiSi0.8 合金的热物理性质, 发现其表面张力随温度呈线性变化, 粘度随温度呈指数性变化, 在液相线 1533K 处表面张力和粘度分别为 1.27 和 9.30mPa s。使用 COMSOL 多物理场仿真软件结合实验测量的热物理性质, 计算了超声悬浮条件下合金熔体的振荡行为, 得到其振荡频率约为 100Hz, 该结果与高速 CCD 记录的振荡频率相吻合。超声悬浮样品的凝固组织随过冷度的增加逐渐细化, 当 $\Delta T > 109\text{K}$ 时, 初生 FCC 相枝晶形貌由树枝晶转变为海藻晶, 分析表明, 声悬浮样品内部较大的流速促进了海藻晶的生成。实验发现, 当包晶相过冷度 $> 85\text{K}$ 时, 包晶 Cr3Ni5Si2 相晶体结构由简单立方结构(SC)转变为简单四方结构(ST)。在电磁悬浮条件下, 随着合金过冷度的增加, 凝固组织逐渐细化, 初生相含量增加, 包晶反应逐渐被抑制。当 $\Delta T > 140\text{K}$ 时, 包晶反应被完全抑制, 初生相和包晶相耦合生长, 且其晶体学取向关系满足 $\{110\} \text{FCC} // \{110\} \text{Cr3Ni5Si2}$ 和 $\langle 110 \rangle \text{FCC} // \langle 110 \rangle \text{Cr3Ni5Si2}$ 。以上研究将有助于深入理解 CoCrFeNiSix 高熵合金的凝固热力学和动力学特性, 并指导其材料设计和工业应用。

E08-50

声共振混合技术及其在含能材料领域的应用进展

马宁*

西安近代化学研究所

针对声共振技术在含能材料领域应用的效率和安全优势, 以及声共振应用于含能材料工程化制备的技术挑战, 从声共振混合技术在含能材料制备领域的总体应用情况出发, 系统阐述了其应用效果、效率、安

全性及其影响因素等，并对未来的重点研究方向进行了展望。结果表明：声共振混合技术不仅能够应用于单纯的混合炸药和推进剂混合分散，还因其对被混物料之间的高效界面接触优势而可以应用于单质含能材料的化学反应强化、结晶与共晶；最大效率甚至可以较传统工艺提升达到十倍，且几乎无放大效应，优势明显；未来需在工艺机制、工艺放大、综合效能等方面继续开展深入研究，以加快声共振混合技术在含能材料制备领域的工程化应用进程。

E08-51

面向极低频磁通信的超声驱动旋磁谐振器

储昭强*

哈尔滨工程大学

聚焦空海，空地跨介质通信的应用需求，美国 DARPA 率先提出并开展了“机械天线”的研究项目，旨在发展便携式、低功耗、低频磁场发射机。电磁马达驱动的旋转永磁式机械天线，是主要的机械天线形式之一。其除了能量调制效率不高，通信速率低的问题之外，另一突出问题是天线尺寸大，难以实现微型化与可穿戴应用。哈尔滨工程大学储昭强副教授与北京大学董蜀湘教授团队近日联合报告了一种超声驱动的磁偶极子旋转谐振器（UA-MDRR），为水空跨域通信提供了厘米尺度的移动式可穿戴通信设备。该谐振器采用仅仅几个毫米尺度的多层压电陶瓷，使其工作于双弯曲振动耦合模式（作为超声谐振驱动器），通过摩擦耦合驱动厘米尺度的磁偶极子旋转振荡，高效发射全方向的 ELF 高强度电磁波，不仅降低了驱动电压，还确保了设备小型化。该器件的单位体积产生的 ELF 磁场发射能力高达 $24,000 \text{ nT/cm}^3 @ 1 \text{ m}$ ，在空气中和水下 100 m 处发射的磁场强度分别可达 2.64 pT 和 2.12 pT，而消耗的功率仅为 0.61 W。提出的 UA-MDRR 天线成功演示了空气-海水界面的跨介质通信潜力。

E08-52

稀土掺杂弛豫铁电单晶的成分、结构、性能研究

宋克鑫*, 肖若愚, 郭海生, 李飞, 徐卓

西安交通大学

弛豫铁电单晶由于具有超高的压电性能，在医疗超声换能器、海洋声纳传感器和自适应光学高精度制动器等领域有广泛应用。近年来，稀土掺杂弛豫铁电单晶钙钛矿相 A 位大幅度提升了弛豫铁电单晶的压电性能。本次研讨围绕不同稀土元素掺杂弛豫铁电单晶（PMN-PT 和 PIN-PMN-PT 等）的生长成分、性能表征和构效关系研究，探明不同稀土元素对于弛豫铁电单晶材料的性能贡献，探讨稀土元素对弛豫铁电单晶材料性能影响的规律，为相关超声的应用提供材料基础。

E08-53

超声辅助钎焊异种材料技术及应用研究

付伟*, 宋晓国

哈尔滨工业大学（威海）

针对陶瓷/金属、钨/镁、金属/塑料等异种材料焊接体系，难反应，不易形成高质量接头的问题。本文将超声能场引入焊接过程中，通过超声能场在液态钎料中及液态钎料/母材界面产生的声空化效应，降低了界面反应所需激活能，促进了界面反应，将连接温度降低至 250°C。系统研究了超声功率、超声作用时间、合金化元素等变量对接头微观组织和力学性能的影响规律，建立了工艺-组织-性能之间的对应关系，阐明了超声辅助钎焊异种材料连接机理，相关技术应用于核屏蔽结构、光学窗口等产品。

E08-54

声悬浮条件下合金超常凝固机理研究

耿德路, 闫娜, 解文军, 魏炳波

西北工业大学物理科学与技术学院

高强声场的非线性效应产生的声辐射力可以用来实现材料的悬浮, 为各种类型材料的制备过程提供了无容器超常条件, 可以有效调控液态材料的流动状态和凝固过程。本文研究了声悬浮液滴的流动物理特征、过冷能力、液相分离、晶体形核与生长, 以揭示液态合金的超常凝固动力学机理。在调制超声场中, 观察到了水滴 2~10 阶模式的扇谐振荡。增强的超声强度促进了冰枝晶的形成, 从而降低了水的过冷度。在不互溶的 Al-Cu-Sn 合金的相分离过程中, 富 Sn 液相的迁移主要由液滴变形和旋转所主导。在声悬浮过程中, 液态 Ag-Cu-Ge 和 Ni-Sn 合金的高过冷状态导致了(Ag)枝晶的细化以及非规则(Ni+Ni₃Sn)共晶的形成。超声与液体的相互作用还导致共晶合金在无容器凝固过程中出现表面波现象。

E08-55

W90/Sn-Ti/AZ31B 接头超声辅助低温钎焊工艺及连接机理

孙浩, 张旭东, 付伟*

哈尔滨工业大学(威海)

在核能应用领域, 核辐射屏蔽体是核装置中的重要组成部分, 其主要作用是保障电子器件的长期、稳定工作。钨/镁双层金属具有无毒、高硬度、优异的核辐射屏蔽性能、低中子吸收截面等优点, 有望成为新一代核辐射屏蔽体, 实现钨合金与镁合金的低温钎焊对推动核辐射屏蔽体的发展和核装置的长期服役具有重要意义。针对钨合金与镁合金熔点、线膨胀系数等物理性质差异较大的问题, 本文提出了 W90 钨合金与 AZ31B 镁合金超声辅助低温钎焊的方法, 即在超声能场的作用下, 采用 Sn-xTi(x=1.0、2.0、3.0、4.0 wt.%) 钎料实现了 W90 钨合金与 AZ31B 镁合金的低温、可靠焊接。建立了工艺参数-界面组织-力学性能之间的关系, 揭示了超声作用下界面冶金反应机理。在此基础上, 提出了 W90 钨合金表面超声预涂覆技术, 解决了 W90/Sn-Ti 界面与 Mg/Sn-Ti 界面冶金反应速度不一致的问题, 获得了 W90/Mg 高质量钎焊接头。采用 Sn-xTi 成功实现了 W90 钨合金与 AZ31B 镁合金的超声辅助低温钎焊, 分析了工艺参数对 W90/Sn-xTi/Mg 接头微观组织和力学性能的影响。W90/Sn-2.0Ti/Mg 接头典型界面组织为: W90/Sn+Ti₆Sn₅+Ti₂Sn₃+MgSn₂/MgSn₂/Mg; Sn-2.0Ti 钎料与 W 颗粒之间生成 TiO 层, 与(Ni, Fe)粘结相之间生成 Ni₃Sn₄、FeSn₂ 化合物。当工艺参数为 250 °C/100 W 时, 随着超声时间从 4 s 增加至 8 s, W90/Sn-2.0Ti 界面结合面积从 70.6 %增加至 100 %, Mg₂Sn 层在焊缝的占比从 16.4 %增加至 48.5 %。当工艺参数为 250 °C/4 s/100 W 时, 随着 Ti 含量从 1.0 wt.%增加至 4.0 wt.%, W90/Sn-xTi 界面结合面积从 47.5 %增加至 100 %, Mg₂Sn 层在焊缝的占比保持在 16.4 %。当超声功率为 100 W, 超声时间为 4 s 时, W90/Sn-2.0Ti/Mg 接头抗剪强度达到最大值 24.6 MPa, 接头断裂位置位于 W90/Sn-2.0Ti 界面。超声空化效应产生的高温、高压促使活性元素 Ti 在 W 颗粒表面发生富集, 并与 O 元素反应生成 TiO 层。提出了 W90 钨合金表面超声预涂覆技术, 解决了 W90/Sn-xTi/Mg 接头中两侧界面冶金反应速率不一致的问题, 控制了焊缝中 Mg₂Sn 层的占比。超声预涂覆后, Sn-2.0Ti 钎料与 W 颗粒之间形成 TiO 层, 与(Ni, Fe)粘结相之间生成了 Sn-Fe-W 层。随着 Ti 含量、超声功率、超声时间增加, W90/Sn-xTi 界面结合面积逐渐增加。研究了预涂覆处理 W90 对 W90/Sn-2.0Ti/Mg 接头微观组织和性能的影响, 当工艺参数为 250 °C/50 W 时, 随着超声时间从 1 s 增加至 3 s, 焊缝中 Mg₂Sn 层占比从 9.5 %增加至 11.9 %, 接头强度保持在 40.2 MPa, 断裂位置位于 Sn-2.0Ti 钎料中。相比于未预涂覆处理的 W90, 预涂覆处理 W90 后的 W90/Sn-2.0Ti/Mg 接头焊缝中 Mg₂Sn 层占比小于 16.4 %, 接头强度提高了 63.4 %。

E08-56

高性能压电陶瓷的强场驱动特性测试及马达应用研究

于文庆, 高翔宇*, 李飞

西安交通大学

压电马达的小型化与高性能化是目前主流的发展趋势, 其在高输出能力、低功耗、高环境适应性等方面对压电陶瓷的压电系数, 机械品质因数以及居里温度提出了更高的要求。然而传统 PZT 陶瓷性能已接近瓶颈, 且传统的性能测试方法仅关注参数 (如机械品质因数等) 在小信号下的表现, 难以反映材料实际的工作性能, 严重限制了其在高功率场景下的应用。为此, 本研究选用高居里温度 $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ (PIN-PZT) 弛豫铁电体为基体, 系统研究了 Mn 元素掺杂对其相结构、微观形貌及电学性能的影响, 所制备陶瓷性能: $d_{33} \sim 400 \text{ pC/N}$, $T_c \sim 330^\circ\text{C}$, $Q_m \sim 700$, 并展现出高温稳定性。鉴于微型压电马达工作于高功率状态, 本研究结合强场测试系统, 表征了其在强场条件下的机械品质因数与机电耦合系数, 为评估其实际工况下的能量转换效率提供了依据。基于此高性能 Mn-PIN-PZT 材料, 本研究进一步设计并制备了一款微型压电马达, 初步验证了该材料在微型驱动器中的应用潜力。

E08-57

Ga-LM/BNNS 导热-屏蔽一体化纳米功能填料的液相超声可控制备

王梓鑫, 陈芳*

西北工业大学

六方氮化硼纳米片 (BNNS) 凭借其高导热性、优异电绝缘性及低介电损耗, 在高端电子封装和热管理领域极具应用潜力。然而, 传统剥离工艺 (如球磨法、溶剂化学法) 面临效率低 (产率 $\leq 5\%$)、能耗高、易引入缺陷等问题, 且 BNNS 片层间强“lip-lip”相互作用导致其在聚合物基体中严重团聚, 显著增大界面热阻, 限制其导热性能的发挥。虽有研究提出利用 Ga^{3+} 与 BNNS 的配位作用削弱层间力以辅助剥离, 但传统方法 (如球磨) 仍存在离子扩散动力学缓慢、BNNS 表面物化结构调控困难等问题, 致使填料与聚合物基体的微纳尺度相结构匹配性差, 制约导热-屏蔽一体化性能提升。本研究提出超声-化学协同调控策略, 通过精确调控镓基液态金属 (Ga-LM) 与没食子酸 (GA) 的配位组装过程, 诱导空化强度自增强效应, 实现 Ga^{3+} 离子高效扩散至 BNNS 层间、BNNS 的高效剥离及表面功能化, 构建新型 Ga-LM/BNNS-GA 杂化填料, 为导热-屏蔽一体化材料提供可控制备新途径。以块体镓基液态金属 Ga-LM、BNNS 粉体、没食子酸为反应性改性剂。通过优化超声时间、超声功率及曝气条件, 动态调节 Ga-LM 从块体到微纳米尺度过程中在 BNNS 表面的浸润与铺展行为, 实现 Ga^{3+} 的快速电离平衡。利用超声空化效应产生的微射流和局部高压, 显著加速 Ga^{3+} 向 BNNS 层间的扩散, 克服传统球磨剥离过程中离子扩散势垒高, 扩散效率受限的问题, 以促进 Ga-LM 中 Ga^{3+} 与 BNNS 表面 N 原子的配位键合, 削弱 BNNS 层间强相互作用力, 实现 BNNS 的高效剥离。X 射线光电子能谱 (XPS) 证实了 Ga^{3+} 与 N 原子的配位键合。高分辨率透射电镜 (TEM) 及特高分辨率场发射扫描电镜 (SEM) 表征证实, Ga^{3+} 插层及超声空化产生的剪切力作用可使 BNNS 晶格间距增加, 堆叠厚度降低, 且 Ga-LM 液滴在 BNNS 表面呈梯度分布, 实现多级导热网络的协同构筑。随后, 引入天然多酚没食子酸 (GA) 作为功能单体, GA 中酚羟基捕捉金属中溶出的金属阳离子形成镓基金属-多酚配位组装体 (GA-MPN)。尺寸、长径比各异的 GA-MPN 对空化气泡核的成核和生长过程、超声场的散射作用均可产生不同程度的影响, 通过精确的超声曝气实现空化强度的自增强, 进一步优化 BNNS 片层的剥离效果。此外, 通过调节超声参数 (频率、时间), 溶剂浓度可精确控制聚合反应动力学, 使 GA 原位氧化自聚形成聚没食子酸 (PGA) 并接枝于 Ga-LM 及 BNNS 表面, 有效改善纳米功能填料与聚合物基体微纳尺度相结构的匹配性。当填料添加量为 5wt% 时, 所制得的聚氨酯 (TPU) 基复合材料在保持断裂强度不变的同时, 断裂伸长率提升了 0.26 倍, 导热系数提高了 5.31 倍。该填料同时实现了导热增效、屏蔽增强与界面改性的功能一体化。

E08-58

铌酸钾钠陶瓷中氧空位梯度分布与电致应变的关联研究

徐泽, 王轲*

清华大学材料学院

在无铅压电陶瓷领域, 高电致应变的物理机制一直是研究的热点和难点。本工作聚焦于铌酸钾钠(KNN)基无铅压电陶瓷, 通过缺陷调控和厚度调控, 成功实现了高达 1.9% 的超高压电应变, 并尝试探讨其背后的微观机理。研究发现, KNN 陶瓷中的氧空位在交流电场作用下发生短程跃迁, 这一过程类似于化学应变, 能够局部改变键长和键角, 从而引起材料整体体积的显著变化。通过机器学习分子动力学模拟, 观察到氧空位在钙钛矿超胞中以跳跃方式迁移。此外, 相场模拟结果表明, 氧空位倾向于在晶界和表面均匀聚集, 且在不同厚度的样品中表现出明显的差异。在薄陶瓷中, 氧空位更倾向于向表面层聚集, 导致表面出现更高的应变水平。进一步的实验验证表明, 通过改变退火过程中的氧分压来调控 KNN 陶瓷中的氧空位浓度, 可以显著提高电致应变。在低氧分压下退火的 KNN 陶瓷, 其电致应变水平可达到 3.0%, 这进一步证实了氧空位在实现高电致应变中的关键作用。此外, 通过光学数字全息对样品表面电致应变分布的测量, 证实了应变在整个样品表面的均匀性, 电致弯曲变形的贡献相对较小。

E08-59

弛豫铁电单晶水声矢量传感器研究与性能评估

李智*

哈尔滨工程大学

弛豫铁电单晶因其优异的压电和介电性能, 为高性能接收型水声传感器提供了理想的材料基础。矢量传感器作为新型水声接收器, 凭借其完备的声场获取能力、各向同性噪声抑制特性, 特别是与频率无关的自然指向性, 在低频探测领域展现出独特优势。然而, 基于常规压电陶瓷的矢量传感器在低频段存在灵敏度低、自噪声高的问题, 导致接收信噪比受限, 严重制约了对弱信号的拾取能力及其低频应用潜力。针对此瓶颈, 团队利用弛豫铁电单晶的优异性能, 设计并研制了一系列高灵敏度、低噪声矢量传感器。首先在实验室环境中验证了其性能优势, 近期又开展了海上实际环境下的比对试验。结果表明, 弛豫铁电单晶作为有源功能材料, 在接收低频弱信号时展现出显著的信噪比提升优势。系列研究成果及海上比对试验表明, 弛豫铁电单晶水声矢量传感器能够有效突破传统压电陶瓷在低频弱信号接收方面的限制, 为提升水声低频弱目标探测能力提供了重要的技术支撑。

E08-60

基于超声压印的氮化铝陶瓷表面改性及与金属钎焊机理研究

郭夏君¹, 付伟^{*1}, 司晓庆², 李卓霖¹, 胡胜鹏¹, 宋晓国¹, 曹健², 冯吉才²

1. 哈尔滨工业大学(威海)

2. 哈尔滨工业大学

随着微电子行业进一步向着高效率和大功率方向发展, 大功率电子器件的散热问题逐渐成为电子封装行业关注的焦点。氮化铝陶瓷由于热导率高, 绝缘性能好, 生产成本相对较低等优点被视为最有前途的高导热陶瓷基板材料。然而其表面润湿性差, 难与金属形成可靠连接。本研究创新性的提出了一种超声压印方法, 采用 Sn 基合金, 在 300 °C 的低温和大气环境下, 实现了氮化铝陶瓷的表面金属化改性。随后通过与铜、银、镍低温钎焊, 成功制备了表面敷金属的氮化铝陶瓷基板。TEM 结果显示, 超声场作用下, 在 AlN/Sn 基钎料界面间形成了一层厚度约为 13 nm 的非晶 Al₂O₃ 相, 其形成可以归因于超声空化效应在界面处引发了 Al 的氧化反应。表面金属化氮化铝陶瓷可以与铜、银、镍反应生成与锡的化合物, 形成可靠界面连接。界面微观组织分析结果表明, 在 Cu/Sn 基钎料界面处生成了层状 Cu₃Sn, 在 Cu₃Sn 之外生成了

扇贝状 Cu_6Sn_5 ，同时在钎料中也生成了弥散分布的 Cu_6Sn_5 和 Al_2Cu_3 。而在 Ag/Sn 基钎料界面处生成了扇贝状 Ag_3Sn ，同时在钎料中也生成了弥散分布的 Ag_3Sn 。在 Ni/Sn 基钎料界面间形成了层状 Ni_3Sn_4 ，外侧 Ni_3Sn_4 结构较为疏松。

E08-61

新型医用 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-xCu 合金快速凝固组织调控及其生物性能初步研究

靳占奎

西北工业大学 陕西省人民医院

本研究以新型 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-xCu 多元合金体系，利用电磁悬浮条件下快速凝固技术，获得不同过冷度的 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-xCu ($x=0,4,8$) 合金。研究发现随着过冷度的增加，晶界金属间化合物逐渐均匀细化，且富含 Cu，这说明随着过冷度的增大，可以使合金的晶粒细化。合金随着 Cu 含量的增加硬度显著增加。电化学测试结果显示 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-8Cu 合金展现出优异的耐腐蚀性能。电磁悬浮处理对不同 Cu 含量的合金有不同的影响。抗菌试验显示含 Cu 合金表面生物膜内细菌大部分均已死亡，且合金生物膜的厚度均显著薄于不含 Cu 合金表面的生物膜。这表明 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-4Cu 和 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-8Cu 合金具有良好的体外抗菌性能。将合金样品包埋在 SD 大鼠细菌感染模型体内，将材料周围组织脓液进行培养菌落计数，结果显示不含 Cu 合金组和阳性对照组的细菌培养皿可见大量细菌菌落形成，而含 Cu 合金组细菌培养皿未见菌落形成。这反映出 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-4Cu 和 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-8Cu 合金具有良好的体内抗菌性能。各合金表面 MC3T3-E1 生长状态良好，且各合金组活细胞数量均在 95% 以上，细胞增殖能力正常。HE 病理染色显示各合金组大鼠心、肝、肺、肾组织形态正常，未见明显病理改变。各组 SD 大鼠血红蛋白、血肌酐、转氨酶指标水平均无统计学差异，各合金组 SD 大鼠的血液指标与阴性对照组 SD 大鼠也无统计学差异。说明各 Ti-24Nb-4Zr-8Sn-xCu 合金具有良好的体内外生物相容性。

E08-62

压电响应 Bi_2WO_6 基界面超声空化强度自检测系统构筑精确结构复合光阳极

赵若汶，陈芳*，翟薇*

西北工业大学超常条件材料物理与化学教育部重点实验室

针对超声化学反应中液-固界面空化强度原位监测的难题，创新性地提出了一种利用压电纳米阵列的界面声空化强度自感知系统。该系统利用纳米阵列的本征压电转换特性将声场机械能原位转换为电信号，实现溶液相中液-固界面超声空化声强度的动态量化。以钨酸铋 Bi_2WO_6 (BWO) 纳米片阵列为模型压电材料，在其表面集成防导通层和双电极结构构建了 BWO 自感应检测电极 (BWO SSDE)。通过 BWO SSDE 实时采集液相中超声诱导压电流信号，经信号处理与定标算法获得高分辨率的声压频谱图，解析了不同输入超声强度下基频和谐波频率处声压级强度 (SPL) 变化规律，确认了以三次谐波频率对应 SPL60 kHz 精确量化界面声空化强度的方法，检测灵敏度达 $0.2 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 。利用该系统实现了没食子酸 GA/BWO 异质结构的超声合成过程的界面空化强度的原位监测，建立了没食子酸小分子的超声诱导聚集态演变与界面 SPL 的动态关联，发现调节 SPL 阈值在 28.0–30.5 dB 可定向调控反应路径：有效的促进 GA 寡聚体在 BWO 表面的定向配位同时抑制 GA 在水溶液中的过度组装。其中表面多酚-Bi 配位结构占比较高且富吸电子基团的 GA0.05/BWO 光阳极在 1.23 V(vs. RHE) 电压下光电流密度提高至 $196.9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，是纯 BWO 光阳极的 18.6 倍。主要由于 GA0.05/BWO 表面吸电子基团作为电子陷阱有效减少了光生载流子的复合几率，使 GA0.05/BWO 光阳极的载流子分离及注入效率显著提升至 49.0% 和 50.9%。本文提出的压电纳米阵列的声场自感知系统有效的解决了液-固界面能量传递的原位监测瓶颈，不仅为其他压电材料构建传感电极提供研究的新范式，也为超声化学法合成有序纳米异质结构提供表面微结构优化的新途径。

E08-63

氧化锆陶瓷-有色轻金属超声辅助低温直接连接

王健, 宋晓国*, 李卓霖

哈尔滨工业大学

金属-陶瓷复合结构设计的提出为提高部件的使用性能提供了思路, 氧化锆陶瓷-有色轻金属复合结构有望满足航空航天、生物医学、电子电力等领域复杂服务环境中特定功能部件的要求。目前, 关于氧化锆与金属可靠连接的研究, 主要集中于高热输入的焊接方法, 但由于母材热膨胀系数差异, 接头的残余应力与变形难以控制, 因此实现二者的低温连接是必要的。本研究借助超声振动在材料近表面产生大量位错及空位缺陷, 为原子扩散与界面冶金结合提供条件, 在 200°C, 超声时间 10s 内的工艺条件下, 实现了氧化锆陶瓷与镁、铝合金及其复合材料的可靠连接, 界面反应层为纳米晶及非晶氧化物, 接头强度高于 30MPa, 并基于此提出固相界面原位-声氧化反应机制。

E08-64

超声界面工程调控制备高性能磺化烷基杂化质子交换膜

王进, 陈芳*

西北工业大学

作为最具应用潜力的无氟质子交换膜 (PEM) 基体, 芳香族磺化烷基离聚物由于主链共轭结构限制链段运动及磺酸基团的随机分布造成相分离困难, 导致了水合条件下其质子传导性能与机械性能难平衡的问题。通过溶液共混法制备有机-无机杂化 PEM, 有望利用离聚物-纳米填料间界面相互作用操控优化磺化烷基杂化膜的相分离和质子传输通道微结构。然而, 由于芳香主链的低柔顺性和链间强 π - π 相互作用, 芳香族磺化烷基离聚物在较高浓度铸膜液中倾向形成多尺度聚集体, 降低磺酸基团间及其与纳米填料间的可及性, 导致杂化 PEM 中离聚物-填料间的界面结合弱且无序, 极大的限制了其在电解水等高水合条件下的应用。基于此, 本研究对磺化聚苯砜 (SPPS) 铸膜液引入超声外场处理, 通过改变超声-曝气时间控制空化效应强度, 在保证 SPPS 化学本征链结构特性的前提下, 通过超声场增强的溶剂化作用重构 SPPS 在溶液相中聚集态结构。研究发现, 随超声-曝气时间的延长, SPPS 聚集体在空化协同的溶剂化过程中发生了动态的解离, 其平均尺寸由 512.3 nm 减至 78.8 nm。期间 SPPS 分子链不断伸展形成分子间缔合, 被掩蔽的磺酸基团得以释放并相互聚集。在上述超声处理后的 SPPS 铸膜液中掺杂一定质量分数的碳量子点 (CQD) 制备一系列杂化 PEM。超声-曝气预处理重构 SPPS 聚集态后, 铸膜液中磺酸基团间及其与 CQD 间的接触概率显著提升, 更高数量比例的磺酸基团在更均匀的空间分布上与 CQD 表面基团形成了键合强度和密度更高的界面作用网络, 优化界面相容性的同时在杂化膜内诱导构筑了由尺寸更均一的离子簇组成的连通性更强的质子传输通道结构。超声预处理 45 分钟后掺杂质量比 5% 的 CQD 杂化膜的质子传导率较超声处理前最大提升 39.3%, 溶胀率同比下降 23.7%。

墙报

E08-P01

弛豫铁电单晶 PMN-PT 中局域相互作用与多尺度调控研究

黄夏敏, 韩娟, 帅文君, 庄鑫*

中国科学院空天信息创新研究院

钙钛矿 (ABO₃) 弛豫铁电单晶 (如 PMN-PT) 因其优异的压电性能在传感器与换能器等领域备受关

注，其压电增强机制与局域电子结构的关系是一项很有意义的研究。本研究聚焦于 A 位 Pb(II) 的孤对电子效应与 B 位 Nb(V) 的“d 特性”之间的相互作用，通过第一性原理计算、成分分析及结构表征，揭示了局域电子结构对宏观机电性能的调控机制。研究发现，Pb(II) 的 6s² 孤对电子通过 Pb 6s-O 2p 反键作用诱导晶格畸变，而 Nb(V) 的空 d 轨道（d）通过强 d-p π 键（Nb 4d-O 2p 杂化）稳定氧八面体，二者的动态平衡形成三方相-四方相纳米区域混合结构。我们使用 Device Studio 平台的 DS-PAW 程序，采用 GGA-PBE 泛函对 PbTiO₃、KNbO₃ 等模型体系进行计算。投影能带结果表明，四方相 PbTiO₃ 中，Pb 6p 态在高对称 Z 处因 Pb-O 杂化导致能带能量降低，形成非中心对称畸变，而 Ti(IV) 较窄的 3d 带宽限制了 d-p π 键的形成，使孤对电子主导与 O 2p 的相互作用。KNbO₃ 中 Nb(V) 的 4d 轨道带宽导致的 d-p 重叠更大，较强的 d-p π 键能够增强 B-O 杂化与三方相的稳定性。计算进一步确认，基态呈三方畸变的 Pb-O-Nb 基元中，Nb 与赤道氧（OE）通过 d-p π 键结合，外场作用下 OE 与 Nb 所形成的 π 键断裂，转而与 Pb 形成 sp 杂化的 σ^* 反键态，伴随电荷密度从 Nb 向 Pb 的转移及晶体极化方向改变。第一性原理计算揭示，三方-四方相变的本质是 Nb-OE π 键断裂与 Pb-OE 键形成的过程，这一过程由 Nb(V) 的“d 特性”驱动—Nb 4d 轨道不再有电子填充，使 Pb-O 键重构成为可能。Pb 6s 与 O 2p 能级相近，促使更多 s 成分参与 σ^* 反键的形成，通过 sp 杂化稳定孤对电子驱动的局域畸变。结合晶体的弹性常数分析，Nb-O 键的软化与 Pb-O 键的硬化导致晶体机械谐振频率的下降与压电常数提升，印证了 PMN-PT 压电单晶中纳米极化区混合结构中“d 特性”与孤对电子效应的协同作用。我们通过对 PMN-PT 中原子尺度的电子结构模拟与宏观性能表征，建立了局域相互作用与压电特性之间的关联，为设计高性能铁电材料及器件提供了理论依据。

E08-P02

不同尺度的 TiB₂ 细化剂对 Al-Zn-Mg-Cu 合金挤压时效后组织与力学性能的影响

宋成艺，陈宗宁*

大连理工大学材料科学与工程学院

随着现代科学技术的发展，航空航天领域已经掀起了材料轻量化的浪潮。其中铝合金因其轻质、高比强度和比刚度的特性，已成为许多结构部件的候选材料。铝合金中 7055 合金被广泛应用在航空航天领域。但由于合金元素浓度过高，导致其在铸造过程中容易形成固有的凝固缺陷，如粗枝晶、缩孔和热裂纹等。现有研究表明晶粒细化可以有效改善这些问题。本研究表明微纳双尺寸 TiB₂ 颗粒强化的 7055 合金室温性能优于纯纳米 TiB₂ 颗粒强化的 7055 合金。原因是双尺度 TiB₂ 颗粒中的微米级 TiB₂ 颗粒更容易被吞噬作为非均相形核的位点，而纳米级 TiB₂ 颗粒则被排斥到固液界面，从而在物理上限制了 α -Al 枝晶的生长起到了更好的细化晶粒的作用。

E08-P03

低电压驱动的弛豫铁电单晶行波马达研究

耿志新，高翔宇*

西安交通大学

随着科技的不断进步发展，对于驱动器提出来的要求也越来越高，小型化、高精度、大负载等要求在航空航天、精密制造、生物医疗等领域至关重要。而压电行波马达因其强大的推力和稳定的运动而备受关注，但是压电行波马达在小型化与低压驱动的同时提升其性能仍然是一个挑战。因此我们提出一种采用 B03 振动模态的小型行波马达，采用多层的梯形弛豫铁电单晶来代替扇形陶瓷片作为压电元件，在减小粘贴面积与简化加工工艺的同时提升其性能、降低驱动电压。该马达尺寸仅 8mm×8mm×2mm，重量仅 0.5g，转速可达 300r/min。20V_{pp} 电压下能转动 50g 负载，推重比达 100 倍，其单位体积的负载能力高达 3.9 mN/mm³，比现有报道的小型马达高出 1-2 个数量级，同时该电机所需的功率仅为 0.2W。该小型压电马达可以集成于微型可穿戴设备中，在微型机器人、纳米精密运动、自动视觉系统和触觉界面等领域具有广阔的应用潜力。

E08-P04

一种基于弱边界夹持效应的振动、磁场混合能量收集器

刘睿轩, 高翔宇*, 周济世, 高思琦, 李飞

西安交通大学

周围环境的杂散磁场和振动的能量可以借助磁-力-电耦合能量收集器进行收集, 因此在变压器等智能电网设备的自供电监测系统中工作运行。为了实现对磁场、振动两种能量的同时收集, 人们提出了区别于传统单悬臂梁的改进结构如异形梁等设计, 以期产生两种不同的振型来分别对应收集这两种能量源。然而, 由于异形梁与主梁之间的刚性连接, 在实际服役中这两种振型往往会产生相互干扰, 大幅降低了能量收集电学输出性能。因此, 当前对于磁-力-电耦合能量收集器的性能评估通常是基于单一测试其在纯磁场或纯振动环境下的输出, 而不是在混合环境中进行综合测试。借助弱边界夹持效应的设计理念, 使得主梁和副梁之间可以产生两个互相正交的振型模态, 减少了两者的干扰以及钳位损失, 实现了各自独立的能量收集过程, 有效地解决了异形梁端部与主梁之间的耦合问题, 确保了两种模态下的能量可以被独立且高效地收集。实验结果表面, 在 10e、50.8Hz 的磁场激励下, 该能量收集器的开路电压为 108.67 V_{p-p}, 最大功率有效值为 0.28 mW; 在 106.8 Hz、0.2 g 的振动激励下, 副梁开路电压为 112.08V_{p-p}, 功率有效值为 1.06 mW; 振动、磁场同时激励下, 混合能量手机功率为 1.34 mW, 这为智能电网系统关键设备的自主供电提供了新的方案。

E08-P05

Mn-PIN-PZT 陶瓷的大功率特性及其马达应用

于文庆, 高翔宇*, 李飞

西安交通大学

压电马达在发展过程中逐渐趋于小型化, 其高输出能力、低功耗、高环境适应性等方面对压电陶瓷的性能也提出了更高的要求(压电系数、机械品质因数、居里温度等)。传统 PZT 陶瓷性能已难以满足其小型化需求, 且基于小信号的传统性能测试方法难以反映材料在实际工作状态下的性能参数, 严重限制了其在大功率场景下的应用。为此, 本研究选用高居里温度 Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O₃-PbZrO₃-PbTiO₃ (PIN-PZT) 弛豫铁电体为基体, 系统研究了 Mn 元素掺杂对其相结构、微观形貌及电学性能的影响, 所制备陶瓷性能: d₃₃ ~ 400 pC/N, T_c ~ 330°C, Q_m ~ 700。考虑到材料的实际应用场景, 本研究通过搭建强场测试系统, 表征其在大功率条件下的性能参数(如 Q_m, k_p), 为评估其在大功率场景下的应用提供了参考。基于此高性能 Mn-PIN-PZT 材料, 本研究进一步设计并制备了一款微型压电马达, 初步验证了其在压电马达上的应用前景。

E08-P06

考虑惯性力与粘接层效应的 Lamb 波压电传感器动力学模型

徐海鹏, 路晓艳*

哈尔滨工业大学土木工程学院

Lamb 波作为一种先进超声技术, 在结构健康监测中广泛应用。然而现有的传感模型多假定传感器与基板应变协同, 对粘接层与动力学效应尚缺乏研究。为此, 本文建立了压电换能器的一维耦合控制方程, 构建了包含传感器惯性和粘接剪切刚度的 Lamb 波传感动力学模型, 并给出了传感器电压信号响应的解析解。结果表明: (1)传感器响应的解析形式受到粘接-惯性效应竞争作用的影响, 高频 Lamb 波下传感器惯性效应显著, 导致信号响应降低; (2)传感器响应具有临界共振效应, 通过调节尺寸、参数可改变共振频率,

获取高幅值响应；(3)传感器惯性效应导致传统准静态假设下传感器尺寸与波长的几何匹配关系发生失效。研究结果可为优化压电传感器的设计和提高结构健康监测系统精度提供理论基础。

仅发表论文

E08-PO01

Microstructure and property modulation of low-beryllium copper alloys by ultrasonic vibration treatments

Jinyun Wang, Zhenyu Hong*

School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China

The rapid advancements in fields of electronic components, mechanical processing, and transportation impose increasing demands for Cu alloys with superior electrical and mechanical properties. High-beryllium copper alloys exhibit high strength, while their elevated beryllium content results in high production costs, decreased electrical and thermal conductivities. Low-beryllium copper alloys maintain superior electrical/thermal conductivity and low cost, while the inadequate mechanical performance severely restricts their practical applications. Therefore, enhancing mechanical properties without compromising the high electrical/thermal characteristics of low-beryllium copper alloys has become a critical issue and required urgent resolution. Herein, the Cu-0.2wt.%Be-1wt.%Co and Cu-0.2wt.%Be-1wt.%Ni alloys are selected for ultrasonic solidification and ultrasonic surface modification treatments, respectively. The mechanisms of ultrasonic vibration on their microstructures and properties are systematically investigated. Ultrasonic solidification experiments revealed that, the coarse $\alpha(\text{Cu})$ dendrites in the cast Cu-0.2wt.%Be-1wt.%Co alloy are greatly refined, fragmented and even converted into equiaxed grain structures under increasing acoustic intensity, with grain size decreasing from 1673.6 μm to 103.8 μm . Moreover, the alloy microhardness increases from 107 HV to 150 HV, and the electrical conductivity maintains at 28-33% IACS. For the solution-treated and cold-rolled Cu-0.2wt.%Be-1wt.%Ni alloy, the combinations of ultrasonic surface modification and subsequent aging treatments demonstrate the formation of a 200 μm -deep gradient hetero-deformation region in the surface layer and the large-deformed internal matrix. The alloy subjected to dual plastic deformation and aging treatments exhibit superior comprehensive properties, including high tensile strength of 894.7 MPa, elongation of 18.3% and electrical conductivity of 60.1% IACS. These results indicate that ultrasonic solidification and surface treatment technologies can modulate the microstructures and properties of low-beryllium copper alloys effectively, providing crucial technical pathways for promoting their widespread industrial applications.